

Analyse et exploitation des données de LIDAR aéroportés pour la caractérisation des milieux boisés de la Suisse

THÈSE N° 4283 (2009)

PRÉSENTÉE LE 11 MARS 2009

À LA FACULTE ENVIRONNEMENT NATUREL, ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT
LABORATOIRE DE SYSTÈMES D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE
PROGRAMME DOCTORAL EN ENVIRONNEMENT

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

Gilles GACHET

acceptée sur proposition du jury:

Prof. A. Mermoud, président du jury
Prof. F. Golay, directeur de thèse
Dr A. Lanz, rapporteur
Dr J. Skaloud, rapporteur
Prof. B. St-Onge, rapporteur



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Suisse
2009

Analyse et exploration des données de LiDAR aéroportés pour la caractérisation des milieux boisés de la Suisse

RÉSUMÉ

Les écosystèmes forestiers présentent des structures variées et en perpétuelle évolution. La connaissance et la description fidèle de ces milieux constituent donc un réel défi. Les méthodes actuelles d'investigation et d'étude du couvert forestier sont généralement laborieuses et parfois difficilement reproductibles si elles reposent sur les compétences d'un petit nombre de personnes. De plus, elles se limitent couramment à une information à deux dimensions dérivées de l'image aérienne ou de levés terrestres. Dans un tel contexte, les modèles altimétriques LiDAR ouvrent la porte au développement de méthodes originales, susceptibles d'apporter un nouvel éclairage, ainsi que des solutions inédites pour améliorer ou faciliter la description et l'étude des forêts.

En pratique, le gestionnaire des forêts doit assurer des tâches de sylviculture, souvent expérimentales, avec des missions d'entretien et d'exploitation de la forêt, ainsi que des tâches liées à l'aménagement, portées essentiellement par l'observation et le recensement. C'est précisément dans cette seconde catégorie que la technologie LiDAR est à même d'apporter des solutions novatrices, en permettant la collecte d'informations précises et fiables sur les objets qui se détachent de la surface du sol. Les outils d'analyse spatiale permettent ensuite d'élaborer des indicateurs ou des documents cartographiques, pertinents pour fixer les objectifs de la gestion forestière, planifier des mesures à prendre pour atteindre ces objectifs ou encore contrôler des résultats obtenus.

L'objectif principal de cette thèse consiste à élaborer des méthodes de valorisation de la technologie LiDAR pour la pratique forestière. Dans un premier temps, les recherches portent spécifiquement sur l'analyse des caractéristiques de base d'un couvert forestier. Il s'agit concrètement d'étudier le potentiel des modèles altimétriques LiDAR pour estimer la localisation et la hauteur des arbres individuels et des peuplements. Dans un second temps, des problématiques plus proches des tâches de gestion sont abordées. Elles concernent spécifiquement l'analyse de la structure horizontale et verticale du boisé, la quantification du matériel sur pied et l'identification des changements significatifs entre deux situations successives sur un même site.

Cette étude s'intéresse à dériver, pour différentes problématiques, des indicateurs synthétiques et normalisés qui puissent répondre aux préoccupations du forestier en apportant une information en mesure d'améliorer la connaissance et la caractérisation des milieux boisés. Une participation plus ou moins active de l'expert est requise pour la paramétrisation des opérations et l'interprétation judicieuse des indicateurs. Ces derniers permettent alors de gagner du temps en favorisant des interventions sur le terrain plus ciblées et plus poussées, sachant que l'investigation par la connaissance plus subjective, mais bien

Résumé

plus riche, du forestier reste nécessaire.

Si les thèmes abordés, ainsi que les développements présentés, reposent sur des problématiques forestières courantes et de nature universelle, ils sont présentés dans un contexte fortement imprégné de la pratique forestière suisse. Les nouveaux apports de la technologie LiDAR, autant que ses limites, sont au coeur de la réflexion.

Mots-Clés: LiDAR, levé laser aéroporté, modèle numérique de hauteur, identification des arbres, hauteur d'arbre, structure forestière, peuplements forestiers, suivi forestier, cartographie.

Analysis and use of airborne LiDAR data for the description of wooden environments in Switzerland

SUMMARY

Forest ecosystems show diverse and evolving structures. Accurate descriptions and a good knowledge of these environments are therefore a real challenge. Existing forest cover investigation methods are mostly laborious, hard to replicate and usually based on the skills of a small number of experts. Moreover, these methods are bound to standard two-dimensional information originated from aerial images or land surveys. The use of LiDAR elevation models leads to the development of new methodologies likely to propose innovative solutions to improve and ease the description and study of forests.

In practice, managers often carry out maintenance forestry tasks as well as experimental ones. These tasks are successfully completed by means of tree observation and census. It is precisely with census that LiDAR technology can provide innovative solutions, allowing collection of accurate and reliable information from objects standing out of ground surface. Spatial analysis tools are then used to establish suitable indicators or cartographic documents to identify and define forest management objectives, to plan measures to achieve these goals, or even to monitor the results.

The main objective of this PhD thesis is to propose new methods based on LiDAR technology applied to forestry. At first the study focuses on basic characteristics of a forest cover. Specific investigation of the potential of LiDAR elevation models to estimate the location, the height of individual trees and stands is carried out. In a second stage issues closer to management tasks are addressed, in particular analysis of horizontal and vertical structure of the forest, quantification of stock and identification of significant changes between two successive planting situations on the same site.

Concerns of this study are to divert synthetic and normalized indicators in order to facilitate the actions and decision making process of the forester. It wants to extract innovative information in order to improve the knowledge and the description of wooden environments. A more or less significant participation of the skilled practitioner is required to configure the operations and to interpret the indicators, purpose of which is to save time by allowing more targeted and more complete ground investigation, subjective factor being in the benefit of the results.

Although discussed issues as well as presented developments are based on common forest problems and of universal nature, they are presented in a context strongly influenced by Swiss forestry. The new contributions as well as the boundaries of the LiDAR technology are central to the reflection.

Résumé

Keywords: LiDAR, airborne laser scanning, digital height model, tree identification, tree height, forest structure, forest types, forest monitoring, mapping.

REMERCIEMENTS

Ce travail de longue haleine n'aurait jamais pu être mené à bien sans l'apport et le soutien d'un certain nombre de personnes de mon entourage académique, mais également familial.

Je remercie tout d'abord le Professeur François Golay pour l'accueil amical et chaleureux qu'il m'a réservé au sein de son laboratoire. Sa confiance et sa générosité m'ont offert l'opportunité d'accomplir une réorientation professionnelle en douceur, mais non moins complète et très enrichissante. Un grand merci également à Régis Caloz qui m'a considérablement aidé par ses encouragements et ses commentaires distillés avec clairvoyance et sagacité.

Je remercie bien sûr le président et les membres du jury qui ont pris la peine d'évaluer cette recherche: le professeur André Mermoud (EPFL), le professeur Benoît St-Onge (Université du Québec à Montréal), le Dr. Adrian Lanz (Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage), le Dr. Jan Skaloud (EPFL).

Je tiens à apporter toute ma gratitude et toute mon estime à Pascal Junod, ingénieur forestier du 3ème arrondissement du canton de Neuchâtel, pour sa curiosité, son ouverture et ses immenses compétences professionnelles qu'il a bien voulu partager avec moi durant nos divers échanges. Ma part de biologiste et de biogéographe gardera un souvenir tout particulier de sa vocation naturelle à communiquer sa passion du monde forestier.

Ma reconnaissance va aux différentes personnes qui ont spontanément répondu à mes diverses sollicitations durant toute la durée de cette recherche. Un grand merci au Professeur Juha Hyypä (Finnish Geodetic Institut, Masala) et à son équipe de m'avoir accueilli à l'institut pour un séjour enrichissant et durant lequel j'ai pu profiter du savoir-faire nordique pour approfondir mes connaissances en matière de données LiDAR appliquées au domaine forestier. Pour la partie forestière, je tiens également à remercier particulièrement Fabian Drollinger (SFFN), Marc-André Silva (SFFN), Jean-Louis Gay (SFFN) et Philippe Steinmann (Inspecteur cantonal des forêts du canton de Genève). Pour la partie plus géomatique, je remercie sincèrement le service des systèmes d'information et de géomatique du canton de Genève, ainsi que le service d'information du territoire neuchâtelois et plus particulièrement Marc Riedo pour ses énormes compétences, son dynamisme et sa curiosité communicative. Un

Remerciements

grand merci également à Roberto Artuso (swisstopo) pour son soutien et les éclairages qu'il a su m'apporter concernant les données LiDAR.

Je me dois également de remercier chaleureusement les membres de l'équipe du professeur Meminod (EPFL) pour leur aide soutenue durant les diverses campagnes d'acquisition et le traitement des données qui s'en est suivi. Un merci particulier à Adrian, Philipp, Ivan et Hervé.

Bien sûr, rien n'aurait été pareil sans la merveilleuse équipe du LaSIG dont je garderai des souvenirs inoubliables pour ne pas dire mémorables. Merci à François de faire régner un tel climat de confiance et d'amitié. Merci à Véronique pour son efficacité et ses conseils sportifs avisés. Merci à Abram pour les nombreux dépannages informatiques, son soutien inconditionnel et sa faculté à me remettre en place lorsque cela devenait nécessaire. Merci à Karine pour sa tolérance, sa générosité et sa joie de vivre. Merci à Stéphane et Jens pour leur générosité, leur appui toujours efficace et pour les nécessaires sorties en courses à pied au bord du lac. Merci à Joël pour son humour inaltérable et pour le courage dont il a fait preuve en relisant la quasi totalité de ma thèse. Merci à Michaël pour ses coups de main toujours aussi percutants et pour son franc parler sans égal. Merci à Elena pour ses précieux coups de main de traduction et pour la patience témoignée face à ma lenteur à libérer les affaires de mon ancien bureau. Merci également aux étudiants de passage au LaSIG et avec qui j'ai pu partager de fructueuses réflexions. Je pense plus particulièrement à Cassien, Yannick et Nicolas. Un grand merci à tous les autres qui ont participé plus ou moins activement aux célèbres discussions du café de 10h à Satellite, c'est-à-dire Eduardo, Thierry, Gilles D., Flavio, Luis, Marc G., Nicolas et les autres.

J'ai été très touché par le soutien de ma famille et plus particulièrement de l'encouragement sans limite de mes parents tout au long de ce travail. Je tiens à adresser plus particulièrement toute ma gratitude à mon papa qui s'est spontanément proposé pour relire mon travail et apporter son éclairage rigoureux et précieux.

Pour finir, ces derniers remerciements s'adressent à Nicole, Lou et Roxane, les trois personnes qui ont su se montrer le plus indulgent et le plus compréhensif. Lou et Roxane, merci pour votre tendresse, votre bonne humeur permanente et merci d'avoir su me ramener à l'essentiel lorsque mon travail prenait l'ascendant. Nicole, merci du fond du coeur d'avoir continué à me soutenir alors que ce travail semblait ne plus finir. Merci d'avoir accepté mes changements d'humeur et mes préoccupations récurrentes, spécialement durant cette dernière année de travail qui fut difficile et frustrante à plus d'un titre.

Gilles, le 3 janvier 2009 à Bursinel.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	i
Summary	iii
Remerciements	v
Table des matières	vii
Acronymes	xiii
Introduction	1
Problématique	1
Contexte de la recherche	2
Objectifs de la recherche	2
Structure des méthodes	3
Méthode de recherche	4
Plan du rapport	5
1. Systèmes LiDAR aéroportés	7
Bref historique	8
Éléments de la technologie laser à balayage	8
Le faisceau laser	13
Détection d'un écho	15
Enregistrement de l'intensité du signal	19
Méthodes de classification des données brutes	20
Formats de données	23
Erreur de la mesure	25
Sources d'erreurs	25
Précisions relative et absolue	27
Planification d'un vol	29

Table des matières

Systèmes existants (pulse & full waveform)	29
Développements futurs	32
Synthèse du chapitre	32
2. Réflexion des impulsions laser par un couvert forestier	35
Comportement des impulsions laser en forêt	35
Modélisation des arbres isolés	36
Modélisation des arbres en peuplement	38
Topographie sous le couvert forestier	40
Point de situation des travaux actuels	41
Synthèse du chapitre	43
3. Description des sites d'étude et des données LiDAR exploitées	45
Introduction	45
Contexte forestier	45
Généralités sur la forêt suisse	45
Cadre institutionnel et législatif	47
Quelques repères de la législation forestière suisse	48
Repères de la législation cantonale	48
Espace géographique	49
Sources et nature des données LiDAR	51
Système Scan2map	51
Paramètres de vol des missions scan2map	52
Système ALTMS 2536 TerraPoint	53
Paramètres de vol des missions ALTMS 2536	54
Système Optech ALTM 3100	54
Paramètres de vol des missions OPTECH 3100	55
Caractéristiques techniques des trois systèmes	56
Synthèse du chapitre	56
4. Détermination de caractéristiques élémentaires à l'échelle de l'arbre	57
Problématique	57
Introduction	57
Localisation des sommets	58
Détermination des hauteurs individuelles	58
Etat de l'art dans le domaine du LiDAR	59
Etudes relatives à la localisation des sommets	59
Etudes relatives à l'estimation de la hauteur des sommets	60
Sites et sources de données	61
La Fruitière de Bevaix	61
Peuplement sur la division 55 de la commune de Boudry	63
Division 8 de la forêt communale de Bevaix	63
Données LiDAR et orthophotos	64
Méthode pour la détection des sommets	64
Création du modèle numérique de hauteur	65
Interpolation par la méthode TIN	65
Interpolation par la méthode IDW	66
Filtrage du MNH	67
Identification des maxima locaux	68
Taille et forme de la fenêtre d'analyse	69
Application sur le site de La Fruitière de Bevaix	70

Influence de la méthode d'interpolation	72
Influence du filtrage gaussien	72
Influence du choix de la fenêtre d'analyse	72
Analyse des résultats	73
Application sur la division 55 de la commune de Boudry	75
Influence des paramètres du MNH	76
Influence de la taille de la fenêtre d'analyse	77
Analyse des résultats	78
Estimation des hauteurs individuelles	80
Exploitation du MNH raster	80
Correction des hauteurs sur la base du nuage de points bruts	81
Application au site de la fruitière de Bevaix	82
Hauteurs individuelles d'arbres en collectifs	82
Hauteurs individuelles d'arbres isolés	82
Régression linéaire sur un échantillon de 59 arbres	84
Application sur le site de la division 8 de Bevaix	84
Analyse des résultats	86
Extraction des arbres remarquables par leur taille	87
Méthode de l'histogramme	87
Méthode du percentile	87
Application au site de la division 8 de Bevaix	88
Analyse des résultats	90
Synthèse et conclusion	91
5. Détermination de caractéristiques élémentaires à l'échelle du peuplement	93
Problématique	93
Etat de l'art dans le domaine du LiDAR	94
Délimitation des peuplements par segmentation et classification	94
Estimation de la hauteur des peuplements	94
Sites et sources de données	95
Les divisions 24 et 45 de la forêt communale de Bevaix	95
Données LiDAR et orthophotos	96
Méthodologie pour la délimitation des peuplements	96
Segmentation du MNH	97
Analyse de sensibilité des paramètres	99
Application sur le site de la division 45	100
Application au site de la division 24	101
Méthode pour l'estimation des hauteurs de peuplement	102
Application sur le site de la division 45	103
Synthèse et conclusion	106
Délimitation des peuplements	106
Estimation de la hauteur des peuplements	106
6. Description des peuplements	109
Problématique	109
Etat de l'art dans le domaine du LiDAR	110
Sites et sources de données	111
La division 45 de la forêt communale de Bevaix	111
La division 24 de la forêt communale de Bevaix	112
Données LiDAR et orthophotos	113
Méthodes de caractérisation des peuplements	113

Table des matières

Le taux de pénétration des impulsions laser	113
La distribution des points bruts selon un découpage vertical discret	114
Influence du seuil de densité	115
Influence du nombre de séparations verticales	116
L'écart-type de la distribution verticale des points bruts	116
Cartographie thématique des peuplements	117
Signature de peuplements par échantillonnage	118
Evaluation des méthodes sur les sites d'études	122
Structure verticale des échos	122
Application sur la division 45	122
Application sur la division 24	124
Cartographie thématique des peuplements	125
Application sur la division 45	125
Application sur la division 24	127
Synthèse et conclusion	128
Structure verticale des échos	128
Cartographie thématique des peuplements	130
7. Détermination d'un taux de boisement	133
Problématique	133
Etat de l'art dans le domaine du LiDAR	135
Sites et sources de données	136
Notre site d'étude	136
Les techniques traditionnelles	137
La méthode CLAPA	138
Données LiDAR et orthophotos	138
Délimitation d'une surface de couvert et calcul du taux de boisement	139
Approche par seuillage	139
Approche individuelle	140
Extraction des sommets	140
Calcul de la taille de couronne	141
Elimination des surfaces bâties	142
Calcul du taux de boisement	143
Application au site de Mont-Tramelan	144
Synthèse et conclusion	145
8. Classification de la densité du couvert	149
Problématique	149
Etat de l'art dans le domaine LiDAR	150
Sites et sources de données	151
Sites d'étude	151
Données LiDAR et orthophotos	151
Classification du taux de boisement à travers une grille régulière	152
Application au pâturage boisé de La Chaux	153
Classification de la densité des sommets	155
Application au pâturage boisé de La Chaux	156
Carte de densité des sommets	156
Classification des quatre grands types de phytocénoses	158
Prézonage final pour le pâturage boisé de La Chaux	159
Evaluation d'une approche combinée	160
Application au pâturage boisé du pré de Mollens	161

Synthèse et conclusion	164
9. Estimation du volume sur pied	167
Problématique	167
L'inventaire «pied par pied»	168
L'inventaire par échantillonnage	170
Etat de l'art dans le domaine du LiDAR	171
Sites et sources de données	172
Secteurs d'inventaires sur le canton de Neuchâtel	172
Secteur du bois de Jussy	173
Données LiDAR et orthophotos	174
Estimation du volume sur pied	175
Localisation des sommets et estimation des hauteurs	176
Relation hauteur-diamètre à hauteur de poitrine	178
Volume sur pied	179
Application aux secteurs des forêts communales de Bevaix et Cortaillod	180
Calcul des volumes	180
Analyse de la structure	184
Application au site du bois de Jussy	186
Volumes sur pied	186
Analyse de la structure	186
Synthèse et conclusion	189
Détection des sommets	189
Tarif de cubage LiDAR	190
Le calcul du volume	191
10. Evolution d'une forêt	193
Problématique	193
Etat de l'art dans le domaine du LiDAR	194
Site et sources de données	194
Le secteur forestier touché par la tempête	194
Données LiDAR et orthophotos	196
Estimation des dégâts	197
Application au site forestier de la commune de Boudry	200
Synthèse et conclusion	203
Conclusion	205
Synthèse des résultats	206
Le LiDAR en consolidation de la démarche du forestier	211
Perspectives	212
Références bibliographiques	215
Glossaire	229
Annexes	233

Table des matières

ACRONYMES

ALTM	Airborne Laser Terrain Mapper
CLAPA	CLassification Automatisée de Photos Aériennes
DGPS	GPS différentiel
DHP	Diamètre à hauteur de poitrine
EAARL	Experimental Advanced Airborne Research Lidar
EPFL	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
GLAS	Geoscience Laser Altimeter System
GPS	Global Positionning System
IFOV	Instantaneous Field Of View
ICESat	Ice, Cloud and land Elevation Satellite)
PAF	Plan d'Aménagement Forestier
PG	Plan de Gestion
PGI	Plan de Gestion Intégré
POS	Système de POSitionnement et d'orientation
PPS	Pulse Par Seconde
LAI	Leaf Area Index
LaSIG	Laboratoire des Systèmes d'Information Géographique de l'EPFL
LiDAR	Light Detection And Ranging
LVIS	Laser Vegetation Imaging Sensor
MNA	Modèle Numérique d'Altitude
MND	Modèle Numérique des Différences
MNH	Modèle Numérique de Hauteur
MNS	Modèle Numérique de Surface

Acronymes

MNT	Modèle Numérique de Terrain
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PFP3	Point Fixe Planimétrique de niveau 3
RTK	Real-Time Kinematic
SAU	Surfaces Agricoles Utiles
SIG	Systèmes d'Information Géographique
SLICER	Scanning Lidar Imager of Canopies by Echo Recovery
SNI	Système de Navigation Inertiel
TIN	Triangulated Irregular Network ou RTI pour Réseau de Triangles Irréguliers

INTRODUCTION

PROBLÉMATIQUE

Dans les années 90, l'altimétrie laser, ou LiDAR¹ (Light Detection And Ranging), a amorcé une révolution dans le monde de la géoinformation. La production de données numériques tridimensionnelles à très haute résolution a rapidement amélioré la connaissance du territoire et a ainsi favorisé l'enrichissement des infrastructures de données géospatiales. Grâce à leur précision, ainsi qu'à leur mode d'acquisition rapide et de moins en moins coûteux, les modèles altimétriques LiDAR se présentent comme une alternative sérieuse pour des domaines aussi variés que l'analyse des milieux naturels, l'aménagement urbain ou encore les télécommunications.

En milieu forestier, l'acquisition de données LiDAR présente des caractéristiques originales. En effet, selon la densité du couvert, les impulsions laser sont en mesure de pénétrer à travers les interstices du feuillage, de renvoyer des échos intermédiaires lorsque les propriétés des objets rencontrés sur le parcours le permettent, et finalement d'atteindre le sol. De ce fait, les données tridimensionnelles enregistrées, dépendantes de la nature et des propriétés du couvert forestier, renseignent simultanément sur la structure en place, ainsi que sur la topographie du terrain. Cette complémentarité d'information offre ainsi la possibilité de déterminer rapidement, et de manière objective, la hauteur du couvert.

Les écosystèmes forestiers présentent des structures variées et en perpétuelle évolution. La connaissance et la description fidèle de ces milieux constitue donc un réel défi. Les méthodes actuelles d'investigation et d'étude du couvert forestier sont généralement laborieuses et parfois difficilement reproductibles si elles reposent sur les compétences d'un petit nombre de personnes. De plus, elles se limitent couramment à une information à deux dimensions dérivées de l'image aérienne ou de levés terrestres. Dans un tel contexte, les modèles altimétriques LiDAR ouvrent la porte au développement de nouvelles méthodologies, susceptibles d'apporter un nouvel éclairage, ainsi que des solutions originales pour améliorer ou faciliter la description et l'étude des forêts.

1. Par convention, l'acronyme LiDAR désigne aussi bien le principe de télémétrie laser que l'appareil d'acquisition lui-même.

CONTEXTE DE LA RECHERCHE

Si les thèmes abordés, ainsi que les développements élaborés, reposent sur des problématiques forestières courantes et de nature universelle, ils sont présentés dans un contexte fortement imprégné de la pratique forestière suisse. Plusieurs raisons justifient ce choix.

En premier lieu, les données forestières existantes en Suisse sont particulièrement riches et d'excellente qualité. Citons pour exemple le canton de Neuchâtel. On y pratique un aménagement forestier reposant sur la "méthode du contrôle", développée au début du 20^e siècle par l'éminent sylviculteur Henry Biolley (Biolley, 1920). L'ensemble des forêts est soumis à un inventaire périodique intégral (à intervalles variant de 10 à maximum 25 ans), excepté quelques rares divisions (trop escarpées, nouvellement boisées ou acquises récemment, de même que les forêts privées de peu d'importance). Ces inventaires constituent une source d'information aussi précieuse que rare pour la validation des traitements. La problématique des pâturages boisés, telle qu'elle est abordée en Suisse, offre également un cadre original et motivant. Elle permet de traiter, à travers des cas concrets, l'étude du potentiel des modèles LiDAR dans l'analyse de structures dynamiques et morcelées.

En second lieu, l'accès aux données LiDAR en Suisse est tout à fait remarquable. Dans le cadre du projet SAU (Surfaces Agricoles Utiles), l'Office fédéral de topographie (swisstopo), sous mandat de l'Office fédéral de l'agriculture, a initié une campagne pour l'acquisition d'un modèle numérique d'altitude (MNA) LiDAR à l'échelle du pays. Il en résulte aujourd'hui une couverture de la quasi totalité des cantons suisses avec une densité de points de mesure supérieure ou égale à 0.5 [point/m²]. Le canton de Genève dispose quant à lui de son propre modèle. En complément, l'acquisition de données par un système LiDAR portable, développé au sein de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), a permis d'enrichir et compléter les sources de données déjà disponibles par un processus de nature plus expérimentale.

OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

Alors que les systèmes d'acquisition LiDAR, ainsi que les processus d'acquisition, sont à maturité, l'exploitation des données est proportionnellement encore peu développée. L'objectif principal de cette étude consiste à présenter plusieurs contributions, issues de la technologie LiDAR, permettant d'apporter une information innovante pour améliorer la connaissance et la caractérisation des milieux boisés de la Suisse. De manière plus concrète, il s'agit de mettre en place une série de méthodes, puis d'évaluer la signification des indicateurs statistiques produits dans le cadre des tâches courantes de gestion (figure I.1).

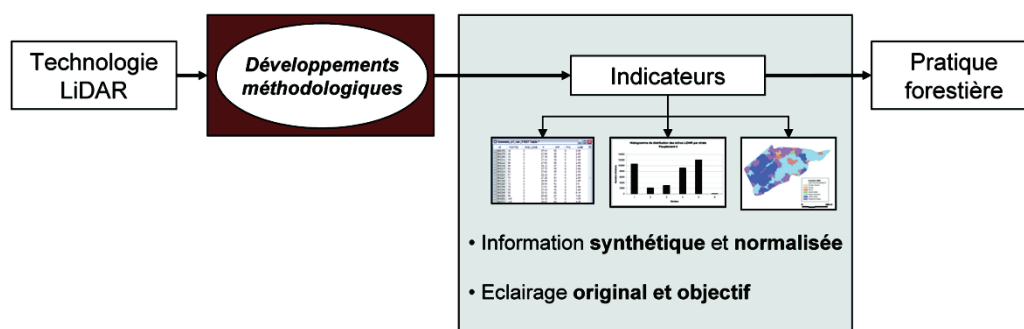


Figure I.1. Objectifs de la recherche.

Dans un premier temps, les recherches portent spécifiquement sur les caractéristiques fondamentales à l'échelle de l'arbre, puis du peuplement:

- localisation et hauteur des individus,
- détermination et hauteur des peuplements.

Dans un second temps, des problématiques concernant plus directement les tâches de gestion sont abordées:

- détermination de la structure verticale et horizontale du boisé,
- quantification du matériel sur pied,
- identification des changements significatifs entre deux situations successives sur un même site.

Alors qu'il existe un grand nombre d'études dédiées à l'analyse des caractéristiques fondamentales du couvert (à l'échelle de l'arbre et du peuplement), l'originalité de cette recherche repose essentiellement sur la proposition de solutions qui associent des données de nature purement forestière (typologie des peuplements, tarif de cubage, etc.) aux traitements des modèles altimétriques. Cette recherche se situe donc à l'articulation entre le développement de méthodes portées sur l'exploitation des données LiDAR et la réponse aux préoccupations du forestier. Elle s'intéresse à dériver, pour différentes problématiques, une information synthétique et normalisée qui puisse apporter un éclairage original et objectif du couvert forestier. A travers un choix judicieux de cas d'étude, le potentiel des modèles LiDAR pour compléter, faciliter ou remplacer certaines pratiques forestières est évalué. Les nouveaux apports de la technologie LiDAR, autant que ses limites, sont au coeur de la réflexion. Afin de contenir la recherche dans un cadre clair et maîtrisable, les méthodes développées reposent exclusivement sur la nature altimétrique des données LiDAR et le potentiel de méthodes intégrant d'autres sources (imagerie en particulier) ont été volontairement laissé de côté.

STRUCTURE DES MÉTHODES

La figure I.2, qui offre une vue synthétique de la recherche, sépare les différentes contributions abordées selon deux classes distinctes. Tout d'abord, les méthodes dites fondamentales concernent l'analyse des propriétés élémentaires du couvert. Elles reposent essentiellement sur des algorithmes connus. Ensuite, les méthodes dites composées sont élaborées en combinant une ou plusieurs méthodes fondamentales avec une information de nature purement forestière. Elles concernent plus directement des problématiques de gestion leur paramétrage requièrent généralement l'avis ou l'intervention d'un expert forestier.

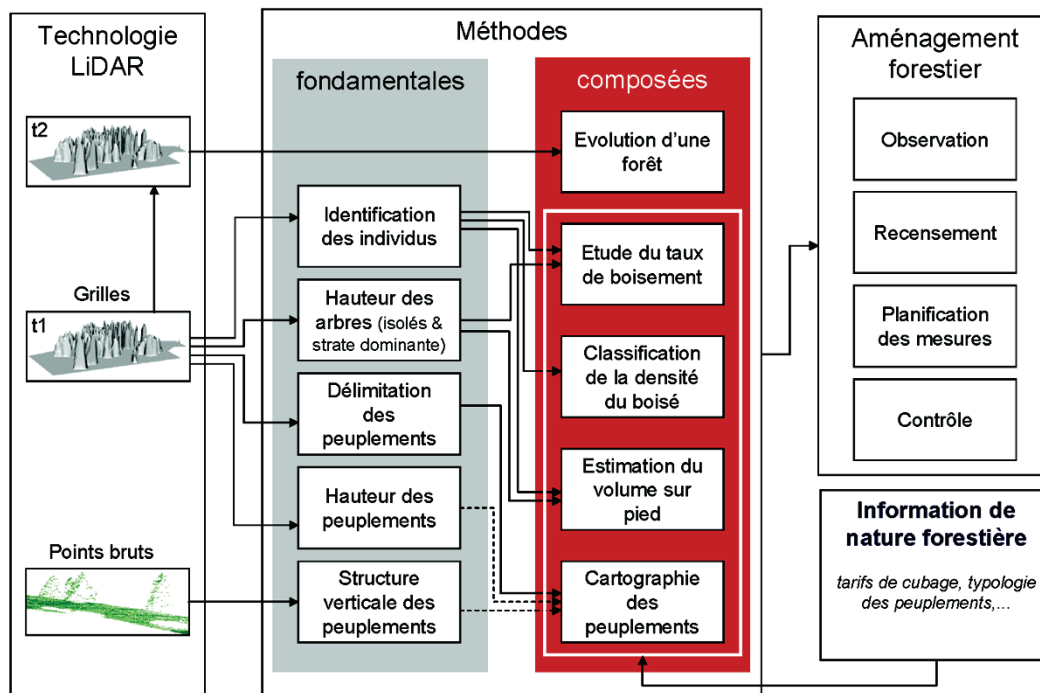


Figure I.2. Distinction entre les méthodes fondamentales et composées.

Chaque méthode se compose d'une série d'opérations, elles-mêmes pilotées par un ou plusieurs paramètres. On distingue trois catégories d'opération, selon le niveau d'interprétation du résultat, et par conséquent le mode d'intervention de l'expert (figure I.3):

1. Les **opérations initiales**, qui se définissent en amont des autres processus, concernent la préparation optimale des données sources. Elles se rapportent notamment à la classification et au filtrage des données brutes.
2. Les **opérations d'analyse** permettent de dériver une information thématique (indicateur) directement exploitable. Elle nécessitent une prise en compte des propriétés locales du couvert et leur paramétrisation reposent sur une interprétation visuelle de l'expert forestier.
3. Les **opérations de calibrage** produisent également une information thématique directement exploitable par l'expert forestier. Elles impliquent cependant un processus de calibrage avec des données forestières de référence comme un tarif de cubage ou une typologie déterminée.

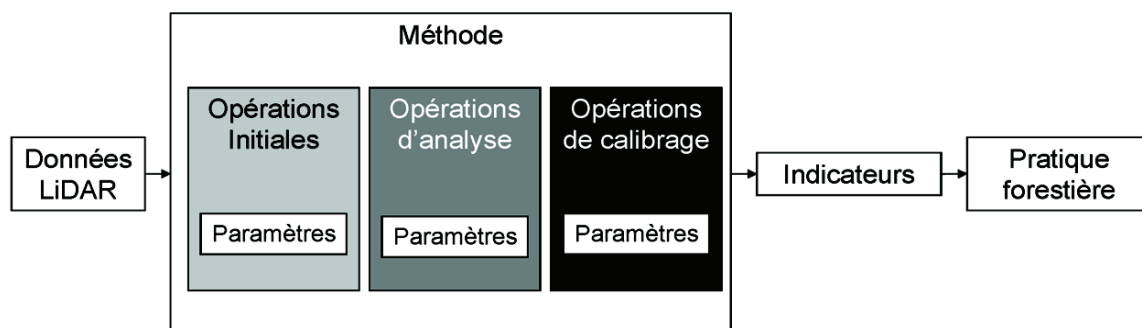


Figure I.3. Structure des méthodes.

MÉTHODE DE RECHERCHE

Le cœur de la recherche est constitué par une série d'études empiriques, répondant à des problématiques soulevées à travers une collaboration entretenue entre le laboratoire de SIG de l'EPFL (LaSIG) et quelques agences gouvernementales chargées de superviser et de gérer la forêt (services forestiers des cantons suisses). Il s'agit de proposer et valider plusieurs développements méthodologiques. Chaque cas d'étude est structuré en cinq sections (figure I.4):

- **La première section** introduit la problématique, les outils actuels du forestier, ainsi que les objectifs visés.
- **Le seconde section** dresse un état de l'art des travaux existants dans le domaine du LiDAR. Sans être forcément exhaustive, cette revue de la littérature scientifique présente les recherches ayant inspiré et motivé les développements méthodologiques mis en place.
- **La troisième section** offre une description des sites d'étude, des données de télédétection à disposition, ainsi que des données forestières. Lorsque cela a été nécessaire, les détails relatifs à une campagne de terrain sont présentés.
- **La quatrième section**, qui forge le cœur de la réflexion, décrit les méthodes élaborées et les résultats obtenus. La validation par un ou plusieurs cas pratiques repose sur des calculs statistiques, le développement d'indicateurs, ainsi que sur la comparaison avec des données de référence collectées sur le terrain.
- **La cinquième section** est consacrée aux conclusions ainsi qu'aux perspectives d'exploitation des données LiDAR pour le(s) cas d'étude(s) traité(s).

Pour chaque étude, l'optimisation des paramètres méthodologiques s'est faite à travers une série d'approches itératives. Ces dernières, par l'analyse visuelle d'indicateurs ou l'évaluation de résultats quantitatifs, ont permis de mettre au point des solutions adaptées aux objectifs fixés.

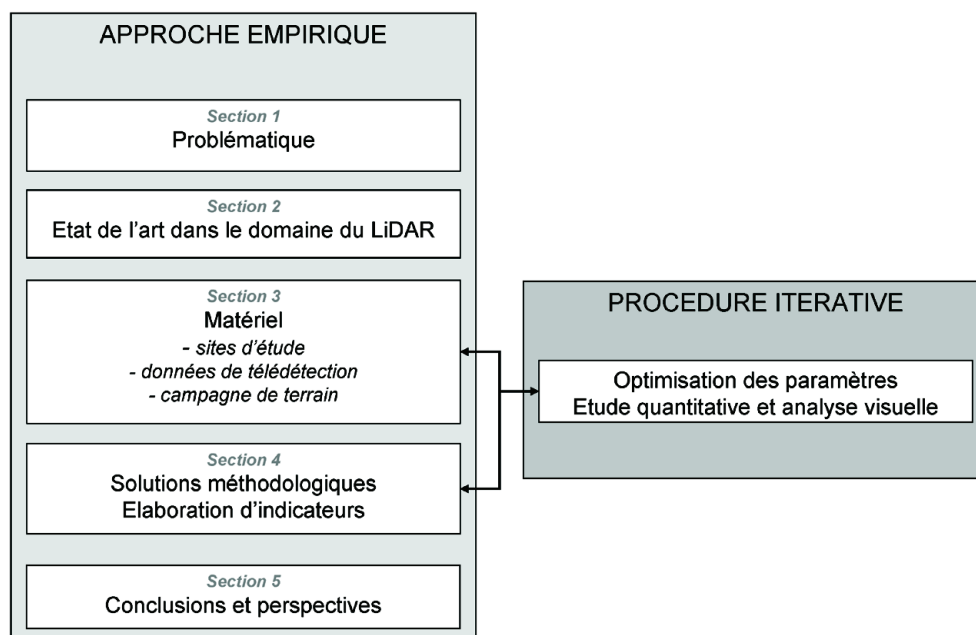


Figure I.4. Méthode de recherche empirique: une structuration des études en 5 sections.

Les données LiDAR ont été exploitées de manière complémentaire sous la forme d'un nuage de points bruts (format vecteur) ou sous leur forme interpolée (format raster). Le choix a été guidé par les objectifs visés. Les méthodologies proposées s'appuient en grande partie sur des outils SIG existants. Néanmoins, afin de faciliter la manipulation des nuages de points bruts, ainsi que l'ajustement des paramètres méthodologiques, une interface informatiques a été spécialement développée pour ce travail. Cette dernière est présentée en détail dans l'annexe D.

PLAN DU RAPPORT

Sur le plan rédactionnel, cette recherche se scinde en deux volets:

Le premier volet est spécifiquement dédié aux éléments théoriques fondamentaux. Tout d'abord, une description détaillée de la technologie LiDAR aéroportée est présentée (**chapitre 1**). Les principes d'acquisition et de calibrage des données y sont notamment présentés, ainsi que les méthodes de classification des données, l'erreur des mesures ou encore la planification d'une mission d'acquisition. Ensuite, le comportement des impulsions laser à travers un couvert forestier est plus spécifiquement étudié (**chapitre 2**). La modélisation des arbres isolés, des arbres en peuplement et de la topographie sous le couvert forestier sont successivement discutés et illustrés. Le chapitre est complété par un bref point de situation des travaux actuels dans le domaine. En dernier lieu, le **chapitre 3** est dédié à la présentation de l'espace géographique considéré dans cette recherche. Il décrit le contexte forestier, le cadre institutionnel et législatif ainsi que la source et la nature des données LiDAR utilisées dans cette étude.

Le second volet de recherche regroupe les développements méthodologiques qui s'articulent autour de trois thèmes principaux (figure I.5):

Le premier thème concerne l'étude des caractéristiques fondamentales du couvert forestier. Les traitements reposent sur l'exploitation exclusive de l'altimétrie, afin d'extraire une information à deux échelles d'analyse:

- A l'échelle de l'arbre: la localisation des individus et l'estimation d'une hauteur (**chapitre 4**).
- A l'échelle du peuplement: leur délimitation et l'attribution d'une hauteur moyenne de la canopée (**chapitre 5**).

Le second thème aborde l'analyse et la description des peuplements d'une manière plus approfondie. Le découpage repose sur une succession d'applications plus directement liées à la pratique forestière. Si les traitements reposent sur l'exploitation des primitives forestières étudiées dans la première phase, ils se différencient par l'injection d'une information complémentaire et plus spécifiquement dédiée à une thématique de gestion. Concrètement, l'analyse porte sur l'évaluation des indicateurs statistiques suivants:

- La cartographie de statistiques portant sur la distribution des hauteurs de points bruts (**chapitre 6**).
- L'étude du taux de boisement (**chapitre 7**).
- La classification de la densité du boisé (**chapitre 8**).
- L'estimation du volume sur pied (**chapitre 9**).

Le troisième thème s'intéresse à l'étude diachronique des modèles altimétriques LiDAR (**chapitre 10**). En disposant de plusieurs représentations d'un même site, mais à des périodes ou années différentes, il est possible d'extraire une information sur la dynamique et l'ampleur des changements. Cette analyse considère les éléments dont il faut tenir compte pour s'assurer de la bonne cohérence entre les différentes représentations d'un territoire donné.

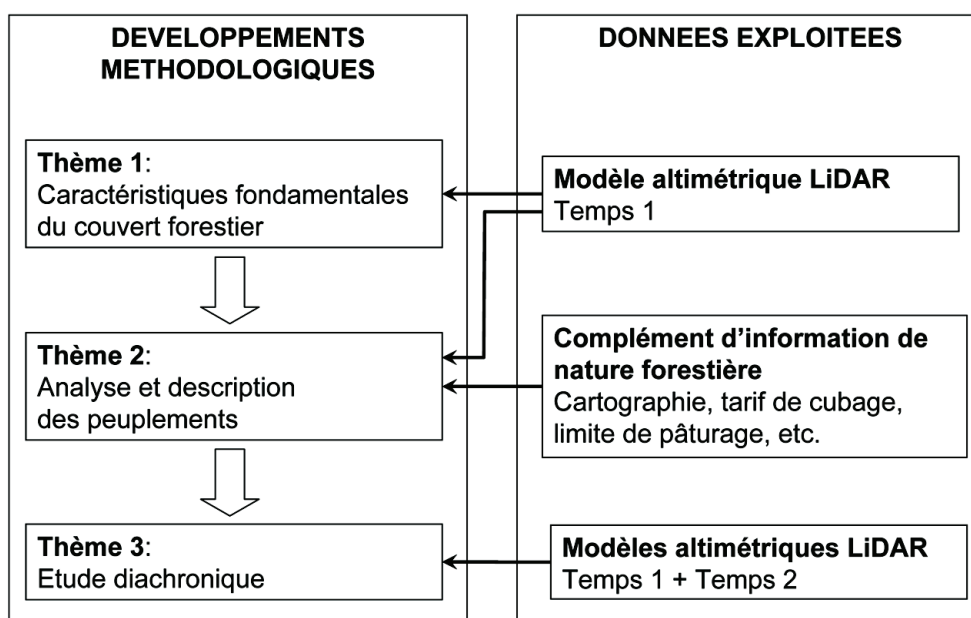


Figure I.5. Situation des trois grands thèmes de recherche dans le contexte d'exploitation des données sources.

En conclusion, nous revenons sur les apports méthodologiques originaux de ce travail, sur leur validation, ainsi que sur la présentation de quelques perspectives pour leur développement ultérieur et leur mise en oeuvre.

SYSTÈMES LiDAR AÉROPORTÉS

Deux types de système LiDAR se distinguent par leur principe de mesure d'une distance au moyen d'un laser. Les systèmes LiDAR à impulsion (*pulsed LiDAR*) utilisent le temps de parcours (*time of flight*) pour mesurer le chemin séparant l'émetteur, monté sur un avion ou un hélicoptère, et une cible. Les systèmes à émission continue (*continuous wave*) mesurent la portée par différence de phase entre le signal émis et réfléchi. Actuellement, les systèmes à impulsions sont nettement plus répandus dans les applications forestières. Ils peuvent aujourd'hui déjà être mis en oeuvre dans des processus opérationnels conforme aux attentes de notre recherche empirique. Les systèmes LiDAR à impulsion se divisent encore en deux grandes catégories selon le mode d'enregistrement de l'énergie des retours. D'un côté, les LiDAR à retour discret (*discret return*) reposent sur un algorithme qui détecte et enregistre en temps réel les montées d'amplitude de chaque impulsion retour et y associe une coordonnées XYZ. De l'autre côté, les LiDAR à échantillonnage d'amplitude (*full waveform* ou *waveform digitization*) mesurent l'amplitude de l'énergie retournée à une fréquence d'échantillonnage d'environ une mesure par nanoseconde, pendant quelques dizaines de nanoseconde pour chaque retour d'impulsion. Le signal enregistré correspond à une onde réfléchie discrétisée le long du rayon. Si les systèmes LiDAR à échantillonnage d'amplitude sont maintenant exploités en milieu forestier pour la réalisation de profils de végétation, leur exploitation demeure pour l'heure essentiellement restreintes aux applications de recherche. Pour le moment, la disposition de telles données n'est pas non plus à disposition sur les forêts suisses. Dans ce chapitre, nous restreignons ainsi nos propos à la description des systèmes à retours discrets, les seuls à avoir été exploités dans cette recherche.

Le présent chapitre a pour objectif de fournir au lecteur les informations principales sur la technologie LiDAR, de manière à mieux comprendre les avantages et les limites de son application en foresterie. Après un bref historique, le principe d'acquisition et les différents composants d'un système LiDAR sont exposés. Une attention particulière est portée sur les mécanismes qui déterminent l'enregistrement d'un écho. Ensuite sont successivement abordées les questions relatives au calibrage des mesures, aux méthodes de classification, ainsi qu'aux formats des données. Ces notions sont essentielles et influencent, dans une large mesure, la précision des modèles LiDAR. Des informations concernant la planification d'une mission de vol, une brève description des systèmes à onde continue, ainsi qu'un aperçu du panel des systèmes existants (LiDAR terrestre, satellitaire) complètent ce chapitre. Pour conclure, des considérations générales sur les développements futurs sont exposés.

1.1. BREF HISTORIQUE

Les premiers développements de systèmes laser aéroportés remontent aux années 70 avec les essais de la NASA et quelques autres expériences aux USA et au Canada (Ackermann, 1999). Dès les années 80, il y eut les premières études de faisabilité pour l'utilisation de profilomètres laser aéroportés pour l'aide à l'inventaire (Solodukhin et al., 1977; Nelson et al., 1984; Aldred & Bonnor, 1985; Maclean & Krabill, 1986). Parallèlement, l'université de Stuttgart a réalisé d'importantes recherches sur la précision géométrique des données dans le but de produire un modèle numérique de terrain (MNT). Les difficultés rencontrées lors des premières études concernaient le manque de précision dans le positionnement de l'unité de mesure.

Un pas important a été franchi lorsque la trajectoire de la plate-forme a pu être précisément estimée grâce à l'avènement de la technologie GPS (*Global Positioning System*) ainsi que son couplage avec les centrales inertielles. Très rapidement, les systèmes ont été complétés par un mécanisme de balayage, collectant des données sur une large bande de terrain le long de la ligne de vol. Aujourd'hui, de tels systèmes sont opérationnels commercialement pour la cartographie topographique à grande échelle, les applications hydrologiques, la création de modèles urbains en 3D, la planification de projets de constructions routières ou ferroviaires, ainsi que l'étude du couvert forestier et de ses caractéristiques propres à l'inventaire. Dès les années 90, ces premiers systèmes ont été utilisés pour des applications forestières avec, comme principale préoccupation la détermination d'un modèle numérique de terrain en forêt (Kraus & Pfeifer, 1998). Rapidement, les applications se sont diversifiées et les recherches ont porté sur l'estimation de la hauteur moyenne des peuplements, l'approximation du volume de bois ou encore la classification d'essences forestières (Hyypä et al., 2001a; Persson et al., 2002; Brandtberg et al., 2003; Popescu & Wynne, 2004; St-Onge, 2004).

1.2. ÉLÉMENTS DE LA TECHNOLOGIE LASER À BALAYAGE

Un système laser aéroporté se compose de trois principaux éléments (figure 1.1):

- Une unité de mesure, qui comprend le télémètre à laser pulsé ainsi que les optiques et le système de détection.
- Le scanner qui produit le balayage latéral des impulsions laser.
- L'unité de contrôle et le système de positionnement et d'orientation (POS) réalisé par l'intégration d'un système de GPS différentiel (DGPS) et d'un système de navigation inertiel (SNI ou INS en anglais).

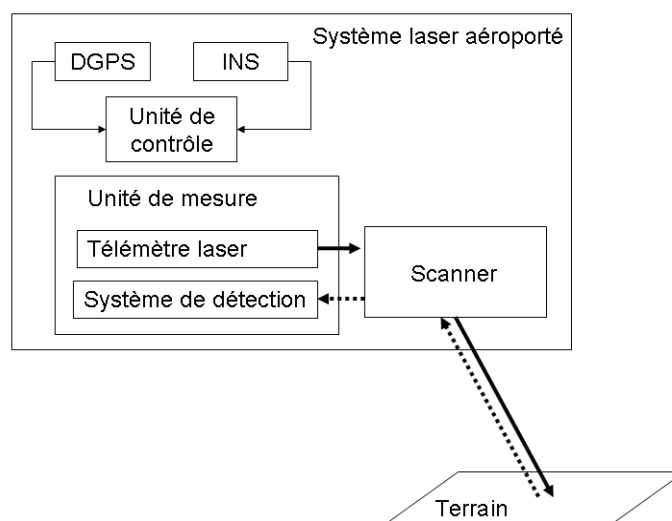


Figure 1.1. Principe d'un système laser aéroporté.

Le principe de fonctionnement est relativement simple. Le système laser est monté sur une plate-forme aéroportée. L'unité de mesure émet des impulsions en direction du sol, celles-ci sont ensuite réfléchies ou partiellement absorbées selon la nature du point de contact. Les impulsions retour sont enregistrées par un capteur. La distance entre la source du laser et le sol, ou tout autre objet, est déterminée par le temps que met chaque impulsion laser à effectuer un aller-retour. Il en résulte un semis de points bruts aléatoires qui modélisent avec une précision élevée la topographie et les éléments de surface. Les unités de mesure actuelles permettent de couvrir rapidement de grandes surfaces avec des densités élevées de mesures (de 1 à plus de 10 [pts/m²]).

La position en trois dimensions d'un point de mesure ne peut être calculée précisément que si l'on connaît en tout temps la position et l'orientation de l'unité de mesure dans le système de coordonnées choisi. La position est acquise par GPS différentiel (DGPS) avec l'exploitation de la phase du signal porteur (CP-DGPS) de manière à atteindre une précision centimétrique, alors que les mesures d'orientation sont fournies par des systèmes de navigation inertiels (INS ou SNI) composés d'accéléromètres et de gyroscopes. Les données inertielles, acquises à hautes fréquences (env. 400 [Hz]), permettent l'interpolation de la position du capteur entre deux observations GPS (acquisition avec une fréquence d'environ 1 [Hz]). L'ensemble des observations issues des différents capteurs est combiné via un filtrage de Kalman afin d'obtenir une solution de navigation complète à une fréquence de mesures suffisante.

Le calcul de la trajectographie du vecteur aérien basée sur le couplage d'une unité inertielle et d'un GPS différentiel permet de transformer les mesures de distance en points 3D géoréférencés (figure 1.2). Grâce au géoréférencement direct, les éléments d'orientation externe peuvent être déterminés sans points de contrôle (*Ground Control Points*). La formulation mathématique du géoréférencement direct peut s'écrire comme suit (Schaer et al. 2003):

$$r_p^m = r_{gps}^m + R_b^m \cdot (a_0^b + R_s^b \cdot r_p^s) \quad (1.1)$$

$$r_p^s = \rho \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta \\ 0 \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

r_p^m	Coordonnées du point dans le référentiel de l'objet.
r_{gps}^m	Centre de projection mesuré par GPS/INS dans le référentiel objet.
$R_b^m(r, p, y)$	Matrice de rotation du référentiel IMU (body-frame) vers le référentiel de l'objet (m-frame). Les angles d'orientation (roulis, tangage, lacet) sont mesurés par l'unité inertielle. Ils varient dans le temps.
a_0^b	Excentricité linéaire (lever-arm) entre le centre de projection et le centre de navigation de l'unité inertielle (IMU) dans le référentiel de l'IMU. Ce terme est supposé constant dans le temps.
$R_s^b(e_x, e_y, e_z)$	Matrice de rotation (boresight matrix) du référentiel LiDAR vers le référentiel body. Les excentricités angulaires e_x , e_y , e_z sont déterminées par calibrage. Elles sont supposées constantes dans le temps.
r_p^s	Coordonnées du point dans le référentiel LiDAR. ρ et θ sont les observations LiDAR (range, encoder angle).

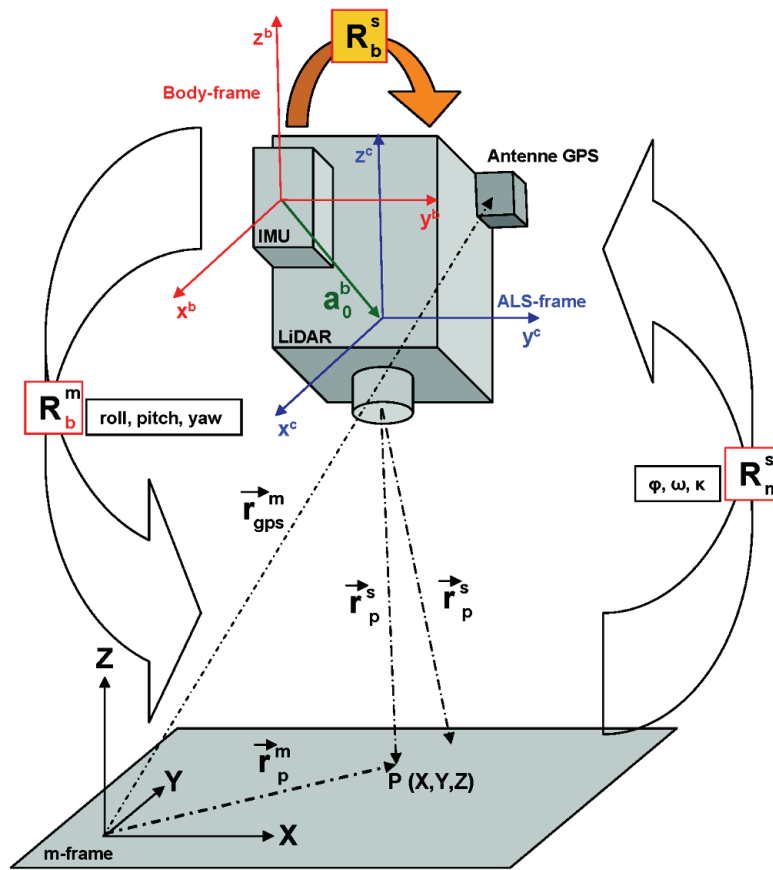


Figure 1.2. Géoréférencement direct des données LiDAR par GPS/IMU.

Indépendamment du calibrage individuel des capteurs, un calibrage concernant la position (lever-arm) et l'orientation (bore-sight) relative entre les capteurs du système est nécessaire (les paramètres de montage). Dans la majorité des systèmes, la position relative entre les capteurs (lever-arm) LiDAR-IMU-GPS peut être déterminée de manière indépendante. La détermination de l'orientation relative entre les capteurs (bore-sight angles) n'est quand à elle possible qu'en vol, une fois que l'orientation GPS/INS devient suffisamment précise (Skaloud et Lichti, 2006). Durant un vol de calibrage classique, un secteur de référence avec des inclinaisons variables est survolé dans différentes directions.

Les mesures laser sont finalement séparées en lignes de vol distinctes afin de procéder à l'ajustage de ces dernières (figure 1.3). Les paramètres de calibrage sont ensuite estimés par un traitement qui exploite les observations GPS, INS et LiDAR, de manière à garantir que les points bruts de l'ensemble des lignes de vol s'ajustent sur la même surface. Il s'agit notamment de corriger d'éventuels écarts causés par des erreurs propres aux capteurs (GPS, INS et LiDAR) ou à leur intégration. Le logiciel TerraMatch de la compagnie TerraSolid peut être employé à cet effet. Lorsque l'ajustement est terminé, les mesures LiDAR (nuages de points bruts propres à chacune des lignes de vol) sont géoréférencées dans le système de référence national souhaité.

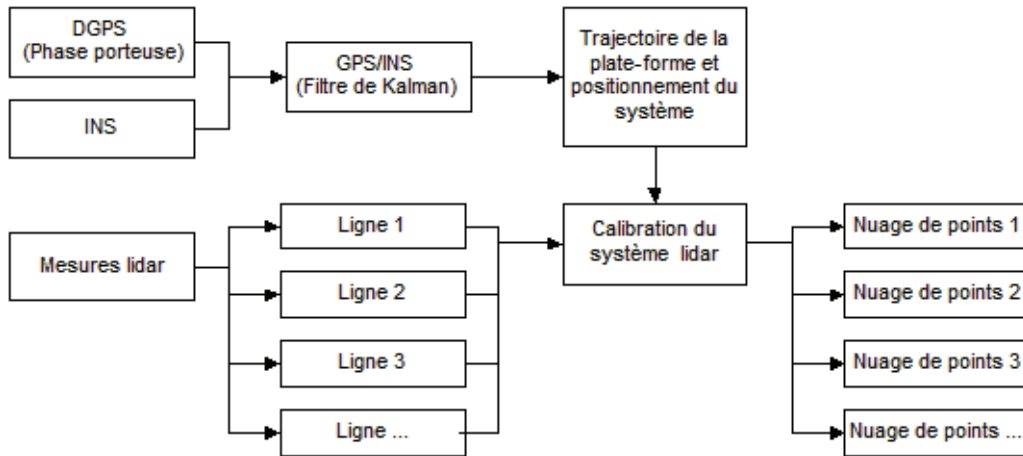


Figure 1.3. Etapes clés du processus de calibration des lignes de vol.

Un positionnement précis dépend de la synchronisation exacte des capteurs (GPS, INS, LiDAR). Concrètement, il y a le temps GPS, sur lequel se réfèrent les données GPS et INS, et le temps de l'horloge interne propre aux mesures de distance. L'horloge interne est synchronisée avec le temps GPS par un signal (PPS - Pulse Per Second) fourni par l'horloge interne du GPS. Chaque mesure est marquée et les marques sont référencées au PPS. A chaque mesure de distance et d'angle est ainsi assignée une marque de temps GPS (Morin, 2002)

De manière synthétique, on résume l'acquisition d'une mesure LiDAR en quatre points:

- Le télémètre laser émet une impulsion laser vers le sol.
- L'impulsion est réfléchi au niveau des objets se trouvant sur son trajet. Une partie de l'énergie diffusée (cette partie est désignée «rétrodiffusion») retourne vers le système de détection.
- Le temps de parcours (Δt) de l'impulsion entre son émission et sa détection par l'unité de mesure est précisément enregistré.
- Le temps de parcours est converti en distance R (Range) par l'équation (c désigne la vitesse de la lumière):

$$R = \left(c \cdot \frac{\Delta t}{2} \right) \quad (1.3)$$

La fréquence d'impulsion pour les systèmes courants varie de quelques milliers de [Hz] à plus de 200 [kHz]. Pour la très grande majorité des systèmes actuels, une nouvelle impulsion laser ne sera émise qu'après la réception de l'impulsion précédente par le système de détection¹. Afin de s'assurer du bon échelonnement des mesures, la fréquence d'émission des impulsions est adaptée à la hauteur de vol H qui détermine le temps de parcours moyen d'une impulsion. La fréquence maximale d'émission des impulsions ν_{\max} est définie par l'équation:

$$\nu_{\max} = \frac{c}{2 \cdot H} \quad (1.4)$$

1. Il existe une nouvelle génération de systèmes LiDAR en mesure de s'affranchir de cette contrainte. Le premier système ayant la particularité d'avoir une approche «multipulse», annoncé en 2006, est le système ALTM Gemini d'Optech. Dans la même tendance, Leica propose sa technologie «Multiple Pulses in Air» (MPiA) implémentée notamment sur les systèmes ALS50-II et ALS60 (Roth & Thompson, 2008)

Le balayage étant perpendiculaire à l'axe de vol, les points mesurés se répartissent selon une bande (*fauçhée* ou *swath width* (SW)) de largeur variable en fonction de l'angle d'incidence des impulsions maximum q_{max} et de la hauteur H de la plate-forme par rapport au terrain:

$$SW = 2 \cdot H \cdot \tan \frac{\theta_{max}}{2} \quad (1.5)$$

Il existe plusieurs systèmes de balayage dont les plus courants sont: (Figure 1.4-a) miroirs oscillants, (Figure 1.4-b) Palmer scan (*nutating mirror*), (Figure 1.4-c) scanneur à fibres (Schnadt & Katzenbeisser, 2004) ou encore (Figure 1.4-d) polygones rotatifs. Les motifs au sol ne dépendent cependant pas uniquement du mécanisme de balayage, mais également de la vitesse de la plate-forme (un ralentissement augmente la densité d'acquisition des mesures dans la direction de vol, alors qu'une accélération produit l'effet inverse), de la direction de vol et de la topographie du terrain. La figure 1.4 illustre ces différents mécanismes ainsi que le motif au sol résultant.

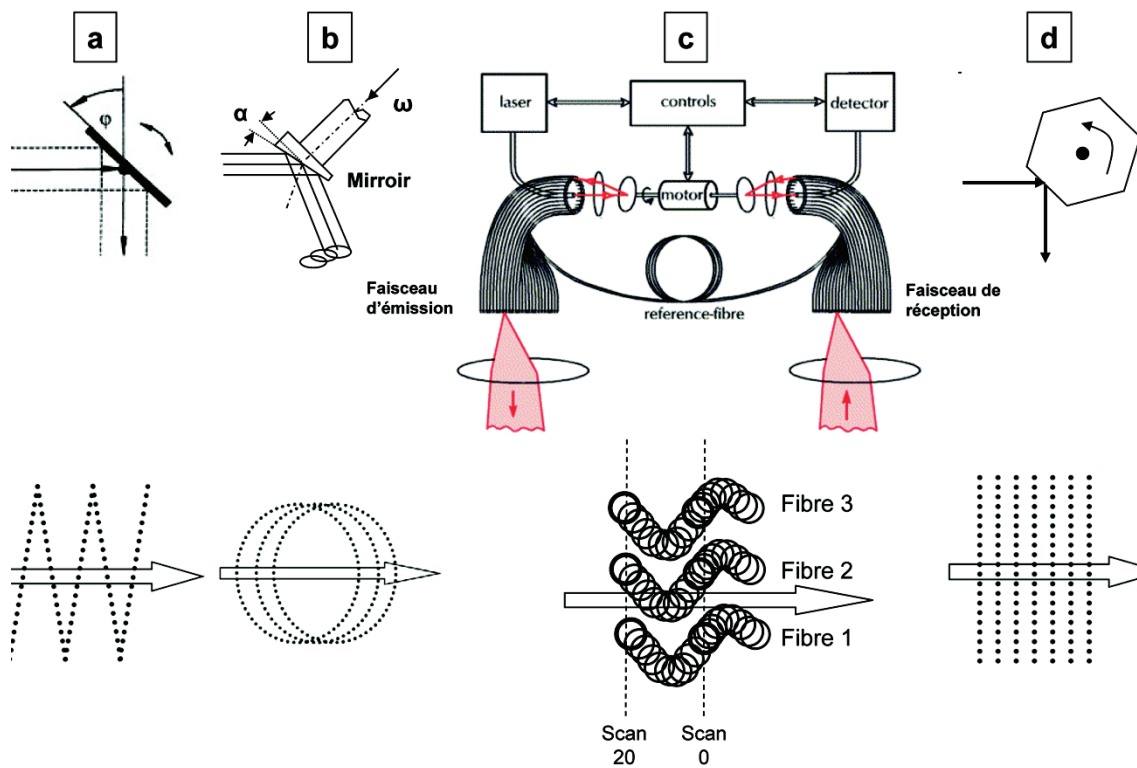


Figure 1.4. Les systèmes de balayage les plus courants: (a) miroirs oscillants, (b) Palmer scan, (c) scanneur à fibres, (d) polygones rotatifs (source: Wehr & Lohr, 1999; Schnadt & Katzenbeisser 2004).

En théorie, la portée maximum d'un système LiDAR à impulsion dépend de l'intervalle de temps maximum Dt_{max} qui est mesuré. En pratique, cet intervalle de temps est bien assez grand et la portée maximale est plutôt limitée par la puissance du laser et par la perte d'énergie inhérente au trajet de l'impulsion.

La réflectivité d'une cible pour une longueur d'onde donnée, influence la portée maximum du système LiDAR. Un sol très humique, par exemple, absorbe la majeure partie du signal de sorte que l'intensité de l'énergie réfléchi est en dessous du seuil de détection du capteur. Certains fournisseurs mettent à disposition un graphique mettant en relation la hauteur de vol et la réflectivité de différentes cibles (figure

1.5). La détection d'un objet à l'intérieur de la tache au sol sera principalement dépendante de la réflectivité de celui-ci et non de sa taille.

Afin d'illustrer ce propos, Baltsavias (Baltsavias, 1999a) donne l'exemple suivant. Considérons un système en mesure de calculer la distance à une surface plane et homogène (d'aire A) avec une réflectivité de 5%. Ainsi, un objet ayant une réflectivité de 100% à la même distance pourra être détecté en ayant une surface minimum 20 fois inférieure ($A/20$). Concrètement, pour une tache au sol de 50 [cm], la surface illuminée sera de 0.2 [m²] et la taille minimum d'un objet ayant une réflectivité de 100% sera de 0.01 [m²] (soit un carré de 10 [cm] de côté). Il ne suffit pas, cependant, de connaître la réflectivité intrinsèque d'un matériau car d'autres facteurs interviennent sur le terrain. Baltsavias mentionne: la puissance du laser, les conditions atmosphériques, les radiations parasites, le type de réflectivité de la cible (diffuse, spéculaire, ou les deux à la fois), la topographie, la structure 3D de la cible, le diamètre d'ouverture du laser, la longueur d'onde, etc.

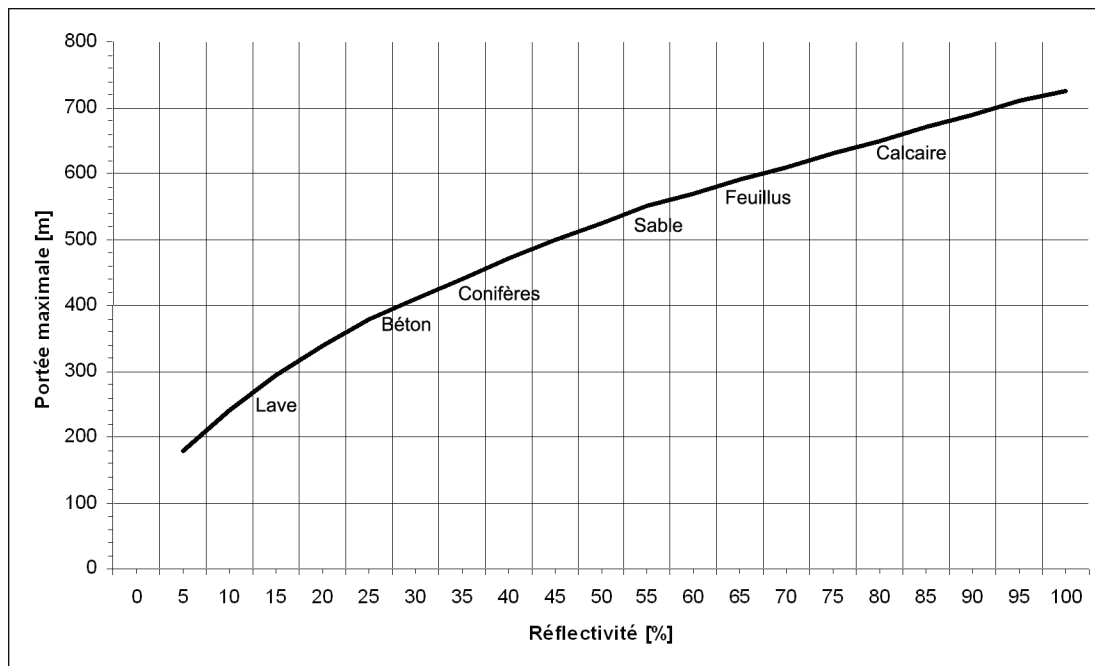


Figure 1.5. Relation entre la hauteur maximale de vol et la réflectivité de la cible (source: Riegl, 2006).

Le choix de la longueur d'onde de la part des fabricants de système laser dépend donc des propriétés de réflexion des objets au sol, mais également des contraintes de fabrication des systèmes LiDAR notamment, la puissance du laser et la sensibilité du détecteur. Les systèmes courants travaillent avec des longueurs d'onde dans le proche infrarouge (900 à 1500 [nm]), afin de bénéficier de la réflexion optimale pour la plus grande diversité des objets au sol (végétation, bâtiments, routes,...). Le photodétecteur détecte d'autant moins de photons qu'un corps absorbe l'énergie incidente. Une longueur d'onde proche de 900 [nm] est, par exemple, adaptée à l'étude du manteau neigeux, alors qu'en milieu forestier, des longueurs d'onde au delà de 1000 [nm] sont privilégiées.

Les systèmes de détection sont généralement des photodiodes PIN ou des photodiodes à avalanche. Il s'agit de détecteurs optiques qui produisent une tension de sortie proportionnelle à la puissance optique incidente. La sensibilité du détecteur revêt une grande importance. Les caractéristiques requises sont notamment: la plus haute sensibilité aux longueurs d'onde de la source, une vitesse de coupure la plus élevée possible de manière à séparer les échos successifs, une faible sensibilité aux conditions extérieures.

1.3. LE FAISCEAU LASER

L'acronyme laser est l'abréviation anglaise de «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation» («amplification de la lumière par émission stimulée de radiations»). Le faisceau produit est généralement très intense, constitué de photons de longueurs d'ondes identiques. Il est cohérent, c'est-à-dire que les photons oscillent en phase. Hors d'un milieu diffusif, le faisceau se propage en ligne droite. Le principe du laser consiste à exciter les électrons d'un milieu, puis à y déclencher l'émission de photons en cascade, et à accumuler le rayonnement entre deux surfaces réfléchissantes avant de le relâcher sous forme d'un faisceau. Pour ce faire, le dispositif du laser comprend une source d'énergie qui, par un mécanisme de pompage, amène les atomes ou molécules du milieu actif (le réservoir d'électrons qui peut être solide, liquide ou gazeux) de leur niveau fondamental E_1 à un niveau d'énergie excité E_2 . On effectue ainsi une inversion de population des couches considérées. Cet état favorise le processus d'émission stimulée, car un photon se propageant dans le milieu actif a alors plus de chance de provoquer la désexcitation d'un atome excité E_2 que de se faire absorber par un atome au niveau inférieur E_1 . A l'issue de l'émission stimulée, on obtient deux photons identiques et en phase. Ces deux photons vont à leur tour donner lieu à deux émissions stimulées et la réaction en chaîne se déclenche. Le nombre de photons identiques et en phase qui traversent le milieu se multiplie très rapidement: c'est l'effet laser. Cependant, ce processus n'est pas suffisant pour produire à lui seul un faisceau laser. C'est pourquoi le milieu actif est placé dans un résonateur optique, constitué de deux miroirs parallèles. Le premier miroir, le réflecteur est totalement réfléchissant, alors que le second, le coupleur, est semi-transparent afin de permettre à la lumière de sortir de la cavité. Les photons, en étant réfléchis par les miroirs, traversent plusieurs fois le milieu actif et provoquent ainsi l'émission stimulée d'un plus grand nombre de photons. La lumière laser doit sa cohérence au fait que les photons du milieu naissent sur le passage d'autres photons et sont donc en phase avec eux dans leur déplacement.

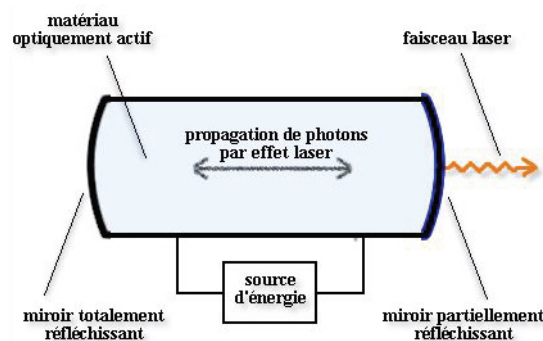


Figure 1.6. Principe du laser (source: http://www.futura-sciences.com/fr/definition/t/matiere-1/d/laser_1989/).

Selon le type de dispositif, le faisceau est émis de manière continue ou sous forme d'impulsions. Cela dépend principalement du mécanisme de pompage utilisé pour exciter le milieu actif et de la capacité du milieu actif à supporter l'énergie qui lui est fournie. Les lasers sont classés en cinq grandes familles, selon la nature du milieu excité: lasers à solide, lasers à gaz, lasers à semi-conducteurs, lasers à liquide et lasers à électrons libres. Les systèmes LiDAR à impulsions sont essentiellement des lasers à solide. Ils utilisent des verres et des cristaux comme milieu d'émission et de propagation des photons (notamment des cristaux de rubis et des verres dopés au néodyme). De tous les lasers, ce sont ceux qui fournissent la plus grande puissance utile. Ils opèrent généralement en mode discontinu, produisant des impulsions lumineuses extrêmement brèves (jusqu'à $1.2 \cdot 10^{-14}$ [s]), donnant accès à l'étude de phénomènes physiques de très courte durée. Dans de tels lasers, le pompage préliminaire du milieu est réalisé par des flashes électroniques au xénon, des lampes à arc ou des lampes à vapeur métallique. Les lasers à solide étendent aujourd'hui leur gamme de fonctionnement aux rayons ultraviolets (multiplication de la fréquence lumineuse dans des cristaux de phosphate de potassium), et même aux rayons X (interaction des photons avec une cible en yttrium).

Les propriétés physiques des lasers utilisés en altimétrie sont: une grande puissance, des impulsions très brèves ainsi qu'une émission dans un spectre étroit (afin de pouvoir notamment utiliser des filtres qui éliminent les radiations parasites). Les lasers Nd-YAG constituent un des types les plus communs de lasers montés sur des systèmes LiDAR. Ils sont pompés optiquement au moyen de lampes flash ou de diodes laser. Les Nd-YAG émettent de la lumière avec une longueur d'onde typique de 1064 [nm], dans l'infrarouge, et la durée d'une impulsion est de 10 à 15 [ns]. Leur puissance peut atteindre plusieurs MW.

1.4. DÉTECTION D'UN ÉCHO

Afin de mieux comprendre ce que représente concrètement l'information résultant d'une acquisition LiDAR, il convient d'examiner le principe et les mécanismes qui déterminent la détection d'un écho. Quels sont les paramètres qui gouvernent l'interaction entre l'impulsion LiDAR et les objets de la couverture du sol? Comment détecte-t-on plusieurs échos pour une même impulsion? Cette section a pour objectif de répondre à ces deux questions essentielles.

Chaque impulsion (ou pulse) est un «paquet de lumière», généralement avec une longueur d'onde dans le proche infrarouge, caractérisé par sa durée (ou longueur), par son intensité et par le diamètre de la tache au sol ou par son angle d'ouverture (IFOV) (Katzenbeisser, 2003a).

La longueur d de l'impulsion dépend de sa durée t :

$$d = c \cdot \tau \quad (1.6)$$

Les valeurs courantes sont d'environ 3 à 10 [ns]. Ainsi, pour une impulsion de 6 [ns], sa longueur sera d'environ 1.80 [m].

Le diamètre A du faisceau au sol va dépendre du diamètre d'ouverture D du laser, de l'angle g de divergence du faisceau et de la distance H séparant l'unité de mesure et le terrain:

$$A = D + 2 \cdot H \cdot \tan \frac{\gamma}{2} \quad (1.7)$$

Sachant que le diamètre d'ouverture D du laser est généralement petit (10 à 15 [cm]), de même que l'angle de divergence g du faisceau laser (généralement comprise entre 0.3 [mrad] et 3 [mrad] pour les systèmes courants) on se permet d'effectuer l'approximation suivante:

$$A = H \cdot \gamma \quad (1.8)$$

L'angle de divergence g du faisceau est fonction du diamètre d'ouverture D du laser, et de sa longueur d'onde λ :

$$\gamma = 2.44 \cdot \frac{\lambda}{D} \quad (1.9)$$

L'empreinte au sol croît d'environ 1/10ème de la valeur de la divergence du faisceau (en [mrad]) pour une augmentation de la hauteur de vol de 100 [m]. Ainsi, pour une hauteur de vol de 750 [m] avec une divergence du faisceau d'1 [mrad], la tache au sol est de 75 [cm]. En règle générale, l'empreinte au sol pour les systèmes LiDAR à impulsion varie entre 10 et 150 [cm].

L'impulsion laser est très brève, mais pas infiniment courte car une telle propriété serait incompatible avec les lois de la physique. Selon le système laser utilisé, la fonction caractérisant l'impulsion varie. De manière simplifiée mais suffisante pour comprendre notre situation, l'impulsion est représentée par un segment croissant relativement court, suivi par un plateau à l'intensité maximale, pour finir par un segment décroissant. Après réflexion de l'impulsion sur sa cible, seule une partie de l'énergie retourne vers le détecteur. La forme de l'impulsion retour dépend des propriétés de la surface réfléchissante (pente, texture, etc.). La détection d'un écho se résume en trois étapes (Katzenbeisser, 2003a):

1. Réception de la partie rétrodiffusée du signal par le système de détection (diode photosensible ou transistor).
2. Amplification du signal.
3. Détection d'un seuil sur le segment croissant (raising edge) du signal retour.

La sensibilité du capteur détermine le seuil de détection d'un écho. Lorsque le segment croissant dépasse une certaine valeur d'intensité, le dispositif électronique enregistre automatiquement le temps retour de l'écho qui servira ensuite à calculer la distance R . Mentionnons encore qu'il existe des systèmes qui modifient la valeur du seuil en fonction de l'amplitude de l'écho, afin de mesurer toujours la même distance à mi-chemin sur le segment croissant (figure 1.7):

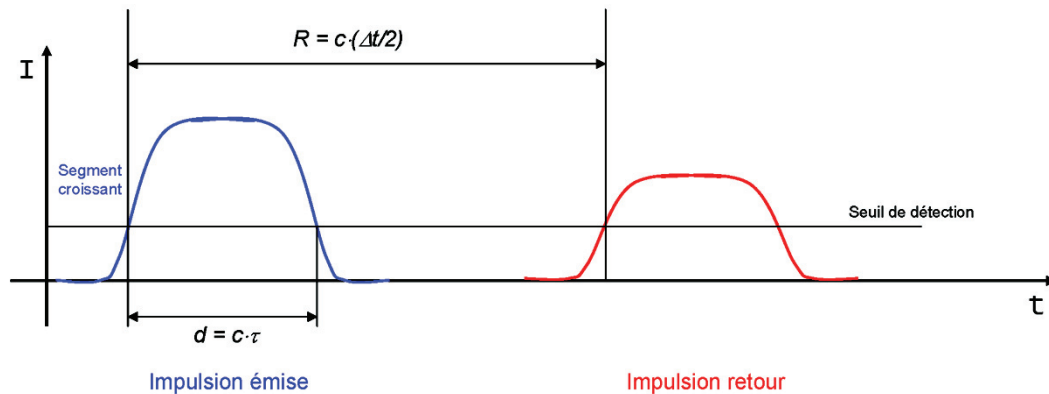


Figure 1.7. Emission et réception d'une impulsion laser caractérisée par sa longueur (d) et son intensité.

Examinons maintenant la réflexion d'une impulsion par un couvert végétal. Tout d'abord, les plus hautes branches produisent un premier écho. La partie du signal non réfléchi poursuit sa route à travers la canopée pour être réfléchi à son tour par les branches et le feuillage se trouvant plus en profondeur et ainsi de suite. Le signal retour se compose donc d'une série d'échos partiels initiés par les plus hautes branches et se terminant au point le plus bas atteint par l'impulsion. Il est important de mentionner que le dernier écho partiel ne représente pas forcément le terrain. Alors que les premiers systèmes LiDAR se limitaient à l'enregistrement d'une mesure pour une impulsion donnée, la majorité des systèmes actuels enregistrent plusieurs échos pour une impulsion: premier retour (first echo), dernier (last echo), ainsi qu'un ou plusieurs échos intermédiaires pour les systèmes les plus performants.

La détection d'échos multiples n'est possible qu'à plusieurs conditions. Tout d'abord, l'intensité des échos doit atteindre le seuil de sensibilité du capteur. Ensuite, les échos ne sont séparables que si le temps séparant deux réflexions successives Dt_r est plus grand que la durée de l'impulsion t (figures 1.8 et 1.9).

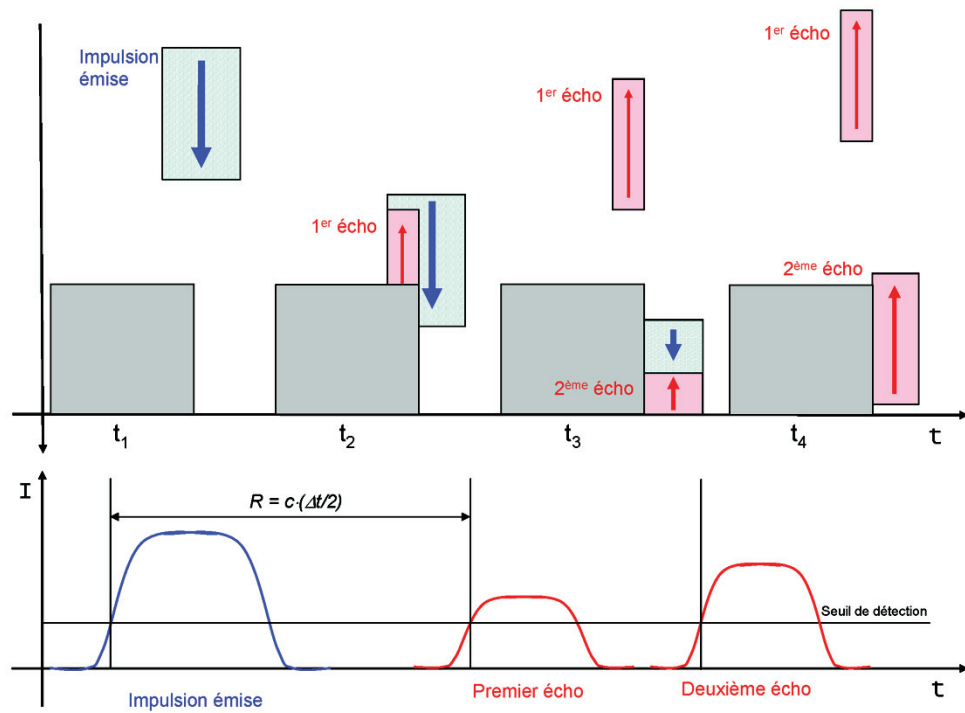


Figure 1.8. Détection d'échos multiples. Premier cas: $\Delta t_r > \tau$

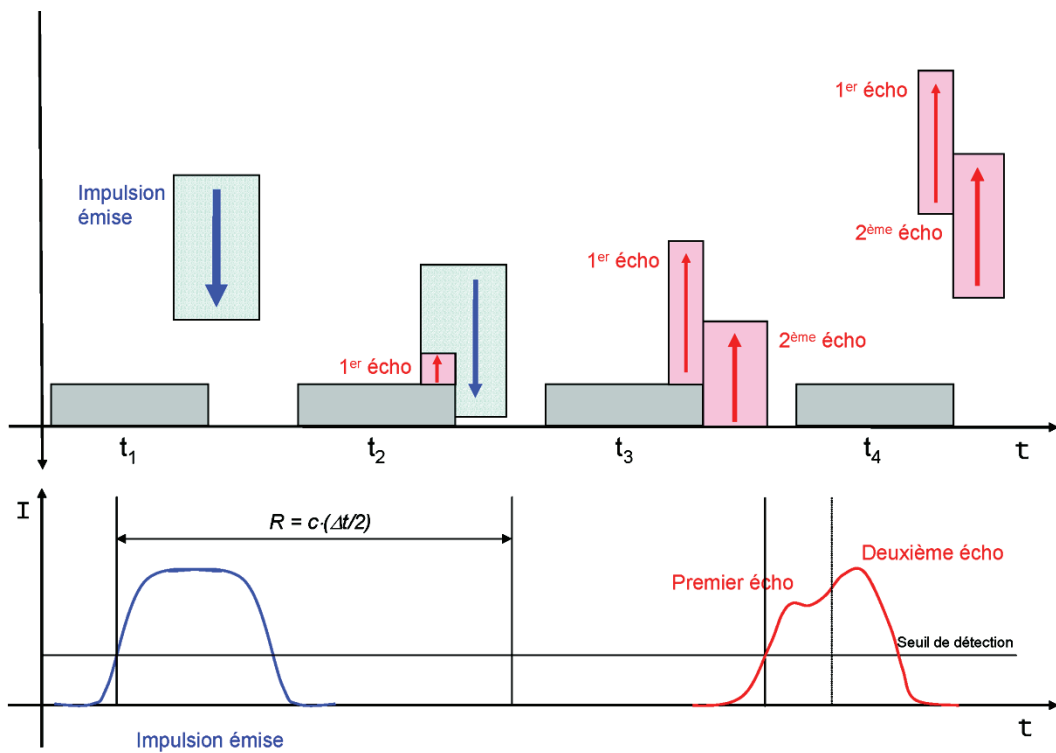


Figure 1.9. Détection d'échos multiples. Deuxième cas: $\Delta t_r < \tau$

La résolution verticale, ou la distance minimum d_{min} de séparation entre deux objets se trouvant le long du chemin d'une impulsion d'une durée t , s'exprime par l'équation suivante:

$$d_{min} = \frac{c \cdot \tau}{2} \quad (1.10)$$

Sachant que les systèmes électroniques de détection ont besoin d'un certain temps de rétablissement (temps de relaxation) avant de pouvoir enregistrer une nouvelle mesure, la distance minimale pour la séparation entre deux objets devient (Katzenbeisser, 2003a):

$$d > c \cdot \tau \quad (1.11)$$

Ainsi, pour une durée d'impulsion de 10 [ns], la distance minimale de séparation entre deux échos se situe entre 1,5 [m] et 3 [m]. En milieu forestier, il est très rare d'observer des niveaux de réflexion distinctement échelonnés (comme c'est par exemple le cas pour les lignes à haute tension) à travers la canopée. Les structures sont généralement complexes. Les couronnes des arbres s'entremêlent créant des échos qui se superposent. On comprend ainsi que la détection de plus de quatre échos pour une impulsion est difficilement réalisable, voire concevable.

Ajoutons que certaines surfaces ne produisent qu'un seul et unique écho (figure 1.10). C'est le cas des routes, des toits de bâtiment, des pelouses, ainsi que des surfaces végétales très denses (peuplement dense de feuillus ou certaines cultures). A l'inverse, certaines structures vont générer systématiquement plusieurs échos, comme les lignes à haute tension, les feuillus hors de la période de végétation ainsi que les limites de toit ou de forêt.

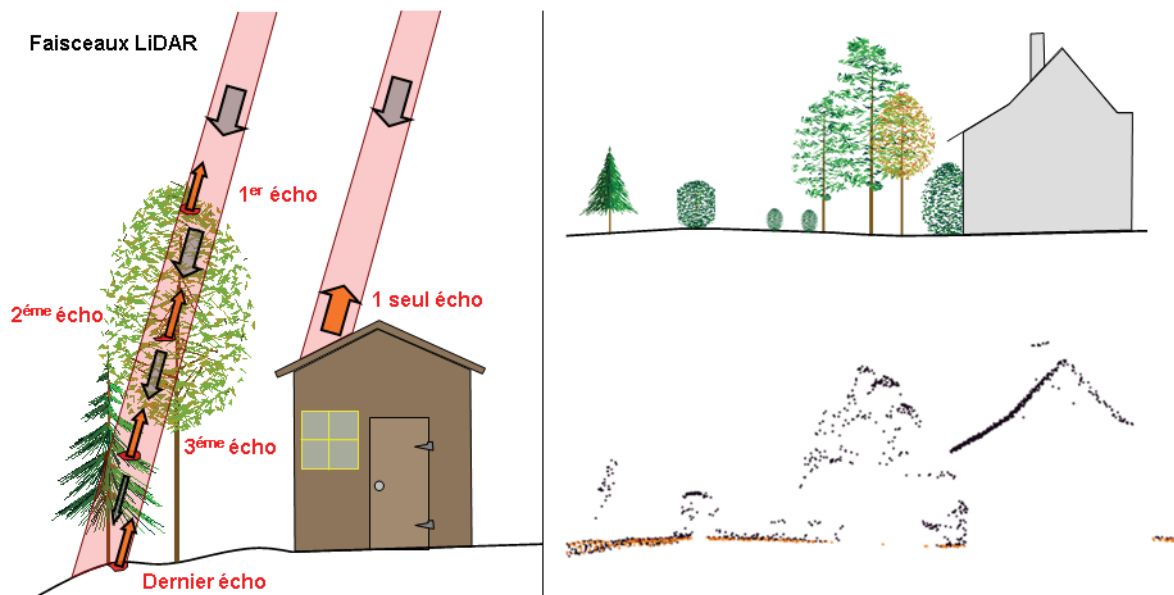


Figure 1.10. Modélisation des échos pour différentes structures. A gauche, enregistrement de plusieurs échos en milieu boisé et d'un unique écho sur un bâtiment. A droite, vue de profil à travers le nuage de points bruts dans un secteur mixte (végétation et bâtiment).

1.5. ENREGISTREMENT DE L'INTENSITÉ DU SIGNAL

Certains systèmes LiDAR ont le potentiel d'enregistrer l'intensité du signal retour. Il est ensuite possible de produire une image monochromatique qui implique un rééchantillonnage de l'information.

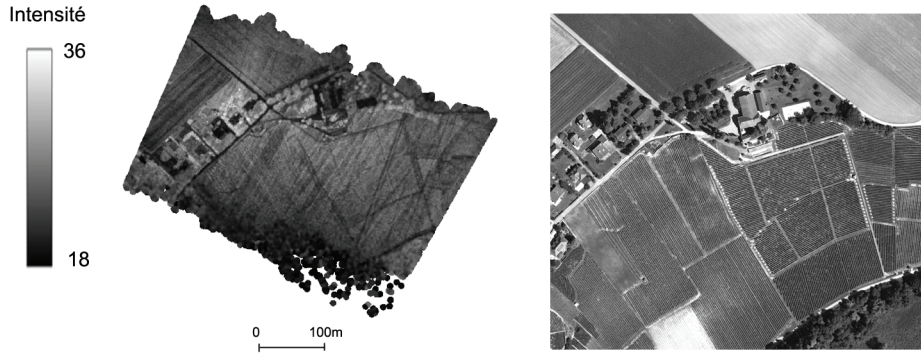


Figure 1.11. A gauche, image d'intensité du signal retour calculée à partir de données Scan2map (longueur d'onde des impulsions laser: 905 [nm], résolution spatiale de l'image: 1[m]). A droite, représentation de la bande proche infrarouge sur le même secteur (bande PIR: 675-950 [nm], résolution spatiale de l'image: 0.25 [m]). Source de données: MNS, orthophoto; © SITN (www.ne.ch/sitn).

Même si les deux représentations de la figure 1.11 semblent apporter une information analogue, il y a deux caractéristiques qui les différencient fondamentalement. Premièrement, contrairement aux capteurs passifs, les systèmes LiDAR sont des capteurs actifs qui produisent leur propre énergie pour illuminer la cible. Les autres sources d'illumination (comme le Soleil) sont alors considérées comme du bruit. L'intensité de réflexion I_r d'une impulsion laser sur une surface homogène est ainsi proportionnelle à la puissance d'émission P_e multipliée par la réflectivité de la surface r , le tout divisé par la surface illuminée A (Katzenbeisser, 2002):

$$I_r \div \frac{P_e}{A} \cdot r \quad (1.12)$$

L'intensité mesurée I_m se définit par la relation (H correspondant à la hauteur du capteur) (Katzenbeisser, 2002):

$$I_m \div \frac{P_e}{H^2} \cdot r \quad (1.13)$$

Il en résulte qu'une même surface illuminée par un capteur réfléchit un signal d'une intensité qui varie en fonction de la hauteur de vol. Une normalisation des valeurs d'intensité devient alors nécessaire pour rendre les mesures comparables entre elles.

Deuxièmement, il faut considérer que, dans certains cas, l'objet illuminé est plus petit que la surface de l'empreinte au sol de l'impulsion. Il en résulte une réflexion partielle où seule une portion de l'énergie émise est réfléchi. Lors d'échos multiples, si les intensités de ces derniers sont mesurées séparément, il devient alors impossible de déduire une information sur la réflectivité de chacune des surfaces ayant produit un écho. Ajoutons que certaines réflexions n'ont pas l'amplitude nécessaire pour causer la détection d'un écho et ainsi permettre la mesure de l'intensité correspondante. La somme de l'ensemble des intensités mesurées pour une impulsion ne représentera donc pas l'intensité totale de la surface illuminée.

L'analyse de l'intensité du signal retour s'avère encore peu étudiée. Citons tout de même pour exemples une étude réalisée à l'université de Séoul traitant du potentiel des données d'intensité LiDAR pour la classification de la couverture du sol (Song et al., 2002), ainsi que des recherches prometteuses sur le calibrage des données d'intensité (Kaasalainen et al. 2005).

1.6. MÉTHODES DE CLASSIFICATION DES DONNÉES BRUTES

Le processus de classification des données LiDAR consiste à attribuer une information thématique aux points bruts. Dans un premier temps, il s'agit de séparer les échos au sol des échos sur les objets de surface (bâtiment, arbres, etc.). On est ainsi en mesure de générer deux modèles distincts: un modèle numérique de terrain (MNT), basé sur les échos au sol, et un modèle numérique de surface (MNS), construit avec l'ensemble des points bruts collectés. Cette étape s'opère sur les données déjà calibrées. Le nombre et la définition de classes supplémentaires dépend ensuite du ou des domaines d'application visés. Les classes les plus couramment rencontrées sont: les points au sol, les bâtiments, les ponts, la végétation (avec parfois une distinction entre la végétation basse et la forêt), les lignes à haute tension, ainsi que les mesures considérées comme erronées (outliers) provenant par exemple d'une réflexion sur un oiseau ou sur la plate-forme elle-même. La classe des outliers est généralement éliminée à la fin du traitement. La classification est toujours initiée par l'extraction des mesures au sol et la création du MNT. La définition d'un MNT LiDAR n'est pas une chose triviale. Avant de débiter tout traitement, il est impératif de s'entendre sur les éléments que l'on considère comme appartenant au terrain et les éléments de surface. Il faut également prendre en considération les constructions temporaires (chapiteau, tente, etc.) ou les véhicules en mouvement. Lorsque de tels objets sont identifiés, ils peuvent être éliminés si la situation l'exige (Luethy & Stengele, 2005). Quoiqu'il en soit, l'automatisation d'un tel processus, à cause notamment de certaines caractéristiques topographiques (fortes pentes) ou de la présence d'une couverture forestière, est susceptible de contenir des erreurs que seul un contrôle visuel systématique peut corriger. Comme cela a été précédemment mentionné, une impulsion laser n'atteint pas nécessairement le sol. L'impulsion se trouve, par exemple, entièrement réfléchiée sur un toit de bâtiment où par une canopée très dense. La sélection des derniers échos (*last echo*), pour les systèmes qui permettent une telle distinction, n'est donc pas une condition suffisante pour extraire les points bruts d'un MNT.

Les données de cette étude ont été classifiées en utilisant la gamme d'application TerraSolid et plus spécialement le module TerraScan. La classification repose sur un processus itératif. Un TIN (Triangulated Irregular Network), peu dense, est tout d'abord calculé sur la base d'une première sélection de points dont on est sûr qu'ils se trouvent au sol. De manière itérative, un nouveau point est ajouté au TIN lorsqu'il répond à certains critères en relation avec le triangle qui le contient. Pour être considéré comme un point sur le terrain, l'angle entre le point, sa projection sur le plan du triangle et le vertex (sommet du triangle) le plus proche doit être inférieur à une valeur seuil (figure 1.12). Le point doit également se trouver à une distance minimale du plan formé par le TIN (Axelsson, 1999). Après chaque itération, un nouveau TIN est calculé. Le processus itératif s'arrête lorsque plus aucun point ne se trouve en-dessous du seuil fixé.

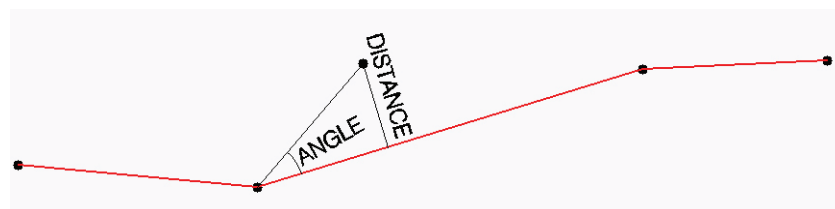


Figure 1.12. Critères de la routine de classification «Ground» de l'application TerraScan (source: Terrasolid, 2005).

En appliquant un filtrage trop sévère, alors que les objets du sursol seront correctement éliminés, des points du terrain sont rejetés. Ces erreurs de type I éliminent donc à tort certaines caractéristiques locales

de la topographie (crêtes, arêtes, ravins, falaises). Un tel lissage du relief n'est généralement pas souhaité et le processus de correction consistant à reclasser manuellement des points du MNT devient vite fastidieux (figure 1.13). L'approche préconisée consiste plutôt à appliquer un filtrage relativement doux et à corriger manuellement les points du sursol assignés au terrain. Ces erreurs de type II sont identifiables relativement facilement grâce à des profils dans le nuage de point bruts (figure 1.14). Les cas de figure les plus souvent rencontrés concernent les ponts, les bâtiments industriels ayant une grande superficie au sol ou encore la présence d'arbustes et de buissons denses. L'appui des images à haute résolution, de même que l'utilisation d'une représentation en TIN du MNT suffisent souvent à lever les doutes et ainsi à faciliter l'élimination des objets du sursol mal classifiés.



Figure 1.13. Erreurs de type I (en noir les points classifiés terrain et en gris les points en végétation).
Source de données: MNS; © SITN (www.ne.ch/sitn).

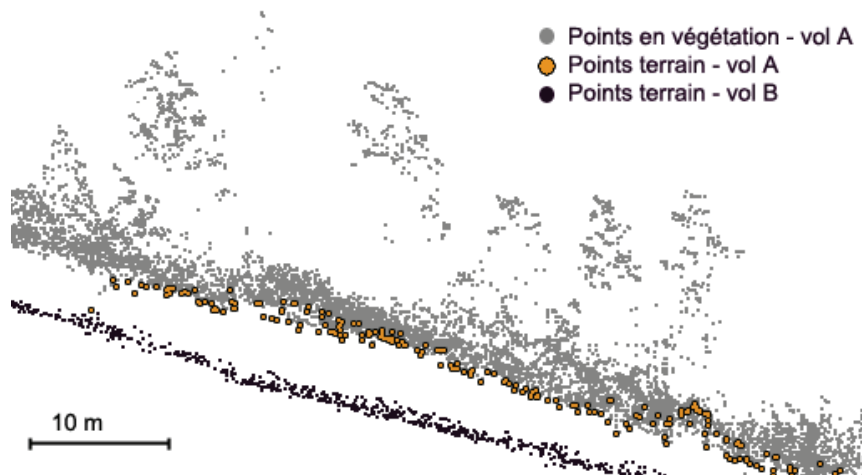


Figure 1.14. Erreurs de type II. Vol A: classification automatique des points terrain par l'application Terrascan; vol B (en noir) les points au sol acquis par une autre campagne d'acquisition en hiver.
Source de données: MNS; © SITN (www.ne.ch/sitn).

La classification sol/sursol des données LiDAR est un processus clé qui fait l'objet de nombreuses études (Sithole, 2005; Bretar, 2006). Si l'ensemble des algorithmes de classification reposent sur l'étude des propriétés locales de la surface du sol, on distingue: les approches par filtrage morphologique (Kilian et al., 1996); les approches par opérateur local (Vosselman, 2000); les approches surfaciques (Kraus & Pfeifer, 1998) ou les approches par densification progressive de TIN, comme celles utilisées pour cette

étude (Axelsson, 1999). Sur les huit méthodes de classification évaluées par Sithole et Vosselmann (2003), aucune ne fournit de résultats parfaits. Si la totalité des algorithmes donnent de bons résultats dans les paysages ruraux peu vallonnés, tous produisent des erreurs dans les secteurs urbanisés complexes et sur des terrains en pente couverts de végétation. Pour cette étude, le choix d'une approche par densification progressive de TIN s'est imposé pour des raisons pratiques et de cohérence entre les différents jeux de données LiDAR (données issues du projet SAU et nouvelles acquisitions avec le système Scan2map). Dans le contexte forestier suisse, il serait néanmoins intéressant d'étudier plus en profondeur la performance des algorithmes en forêt de montagne, avec la présence de falaises ou de fortes pentes. Plusieurs méthodes semblent très prometteuses, comme celles développées par Lee & Younan (2003) ou Belton & Lichti (2006). Dans cette dernière étude, une classification des données est réalisée sur la base d'un critère de courbure locale. La courbure géométrique d'un point M_{curv} d'un point p_i est estimée par les vecteurs normaux de l'ensemble des points du voisinage $N_p(k)$:

$$M_{curv}(p_i) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \|n_{p_i} - n_{neighbour\{j, p_i\}}\| \quad (1.14)$$

k = taille du voisinage

n_{p_i} = normale du point p_i

$n_{neighbour\{j, p_i\}}$ = normale du $j^{\text{ème}}$ point voisin de p_i

En général, les points au sol ou sur les bâtiments sont caractérisés par des valeurs de courbures faibles, alors que les points en végétation ou en bordure de toit génèrent des valeurs de courbures élevées.

Le processus de classification a une influence directe sur la qualité et la précision du MNT. Dans la pratique, il s'agit d'accepter une certaine marge d'erreur qui dépendra en général de l'utilisation finale du modèle. De la même manière que pour le calcul du MNT, il existe de nombreux algorithmes permettant l'extraction d'objets particuliers du sursol comme les bâtiments, les lignes à haute tension ou encore la végétation. Il devient alors possible de calculer des MNS adaptés pour une thématique spécifique (figure 1.15). Par exemple, il peut s'avérer utile de créer un MNS en forêt sans bâtiment ou ligne à haute tension, afin de limiter l'application des algorithmes à notre unique thématique d'intérêt.

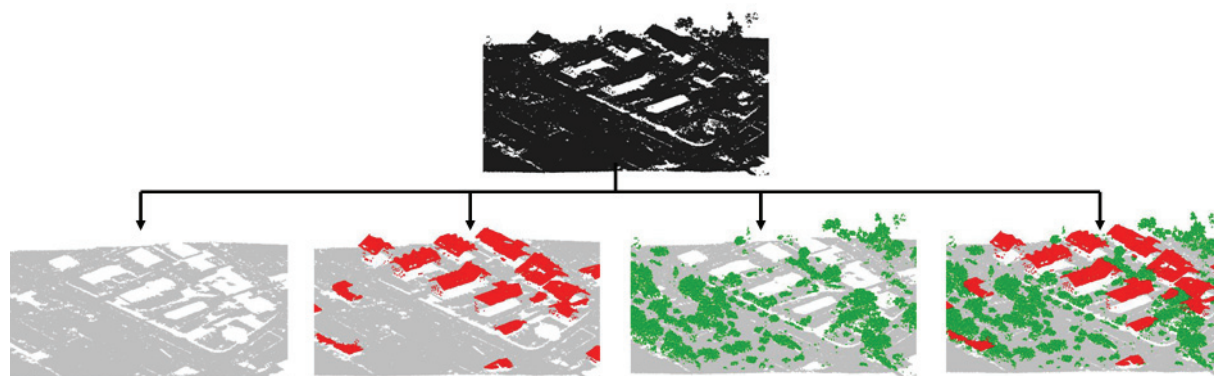


Figure 1.15. Classification du nuage de points bruts. A l'aide d'outils informatiques, il est possible d'extraire du nuage de points bruts initial: le terrain, les bâtiments et la végétation. Si des routines permettent d'automatiser une partie importante du travail, les corrections manuelles restent de mise.

Source de données: MNT, MNS; © SITG (www.SITG.ch)

Afin de s'affranchir du relief, et ne conserver que l'information de hauteur des objets de surface, une opération courante consiste à soustraire le MNT au MNS. On obtient ainsi un modèle numérique de hauteur (MNH), nommé également modèle numérique de la canopée (MNC) lorsque l'on se situe en zone forestière.

La qualité des MNT et des MNS dépend directement, en plus de la densité des mesures et de la précision des systèmes LiDAR, des logiciels de post-traitement (Wehr & Lohr, 1999). Les algorithmes de calibra-

ge et de classification des données LiDAR brutes sont d'ailleurs pour la plupart des solutions propriétaires. On estime raisonnablement que le temps de post-traitement pour le calcul d'un MNT est trois fois supérieur au temps d'acquisition des données (Wehr & Lohr, 1999).

La validation d'une classification s'avère délicate selon les cas. Citons en exemple les travaux réalisés par swisstopo dans le cadre du projet SAU (Artuso et al., 2003). L'acquisition d'un modèle LiDAR à l'échelle nationale rend la tâche de validation du MNT particulièrement laborieuse et cela d'autant plus que la Suisse est un pays de montagnes. Afin d'assurer une qualité finale conforme aux exigences du projet (densité minimale de 0.5 [pt/m²] et une précision altimétrique de 50 [cm] (1s)) swisstopo a mis en place une stratégie de validation qui repose sur une vérification globale (densité des points laser, contrôle visuel, contrôle altimétrique, comparaison avec un modèle existant de plus faible résolution - MNT25) couplée à une vérification locale systématique (comparaison avec les points fixes de la mensuration officielle) ou plus ciblée (comparaison avec les résultats de mesures GPS, observation directe du point laser, observation et vérification sur le terrain).

1.7. FORMATS DE DONNÉES

Dans son principe, une campagne d'acquisition LiDAR produit une série de mesures sous forme de triplets de coordonnées (x, y, z) complétés, éventuellement, par d'autres attributs comme l'intensité du signal retour ou l'angle d'incidence des impulsions. Il existe ensuite une série d'outils informatiques permettant de passer d'un fichier de coordonnées («texte») en un format vecteur pour permettre la visualisation à l'écran du nuage de points bruts.

Pour les usages courants, on produit un MNA sous forme d'une grille régulière par interpolation des points bruts. La résolution de la grille est choisie en accord avec la densité des points bruts de manière à maîtriser l'incertitude affectant les altitudes estimées (Smith et al., 2004). Notons que ces dernières dépendent également de l'algorithme d'interpolation. On admet une relation empirique entre la résolution de la grille (Res) et la densité des points bruts (p), soit:

$$p = \frac{1}{(Res)^2} \quad (1.15)$$

Le tableau suivant donne quelques exemple:

Res (m)	p (pts/m ²)
1	1
0.5	4
0.3	11

Tableau 1.1. Relation entre la densité minimale de points bruts (d) et la résolution de la grille interpolée (Res)

Le choix de l'un ou l'autre des formats dépend de l'utilisation que l'on va faire des données et également des ressources et des outils informatiques à disposition. Chaque format a ses propres avantages et désavantages. Afin de faire le bon choix, un certain nombre de paramètres méritent d'être pris en considération.

Format vecteur (nuage de points bruts)

Structure	A chaque objet (mesure) est associée une série d'attributs géographiques (dont la position x, y, z), ainsi qu'une série d'attributs plus ou moins complète en fonction du système utilisé (intensité du signal retour, angle d'incidence des impulsions, type de retour (first of many, last of many, single), etc.
Points forts	Le format vecteur permet d'exploiter toute la précision des mesures. L'information sur la structure tridimensionnelle des données en forêt est notamment conservée.
Points faibles	Les données vecteur sont lourdes à manipuler dans les logiciels SIG courants. La taille des fichiers est vite importante en fonction de la densité des mesures, du nombre d'attributs et du format de stockage (shapefile, dxf, etc.). Cela nécessite des algorithmes performants et généralement relativement complexes pour le calcul de variables dérivées. Notons qu'il existe des fonctions permettant de limiter le nombre de points bruts tout en garantissant une précision altimétrique satisfaisante (<i>thinning</i>).

Format raster (grille régulière)

Structure	Il s'agit d'un maillage de cellules régulières dont la résolution va généralement dépendre de la densité minimale théorique des points bruts.
Points forts	Les données raster se manipulent facilement et permettent d'accéder à toute une série d'algorithmes d'analyse d'image (extraction de données dérivées comme la pente, l'orientation et les courbures).
Points faibles	L'interpolation dégrade de manière plus ou moins prononcée la précision du modèle. Le lissage va dépendre de l'algorithme choisi (Smith et al. 2004; Arnaud & Emery, 2000). Les données attributaires propres à chaque point de mesure sont perdues.

La figure 1.16 présente une comparaison entre un extrait de données LiDAR au format vecteur et au format raster. Dans un fichier vecteur, chaque objet (point brut) peut être décrit, en plus des attributs intrinsèques (géométrie, etc.), par autant d'attributs que nécessaire (définis par l'utilisateur): un identifiant (ID) ou encore la valeur d'intensité du signal retour (I) pour notre exemple. Chaque objet est distribué régulièrement ou non dans l'espace. La représentation des points bruts LiDAR se fait à travers des objets «Point». A l'inverse, un modèle numérique raster est constitué d'une maille régulière de cellules (ou pixels) pour lesquelles une seule thématique est attribuée. Dans le cas des MNA laser, il s'agira de l'altitude ou de la hauteur. Les modèles sont généralement géoréférencés, ce qui fait que l'on connaît précisément les coordonnées de chaque pixel.

En complément, ajoutons que l'utilisation du format binaire «LAS» tend à se généraliser pour le stockage et l'échange des données LiDAR (www.lasformat.org). Ce format public a comme principales propriétés de maintenir la totalité de l'information propre à la nature des données LiDAR et d'optimiser la taille de stockage et la vitesse des traitements. De plus en plus de logiciels exploitant le format «LAS» font leur apparition sur le marché. En complément aux outils permettant la visualisation des fichiers «LAS», il existe maintenant des plugins permettant l'utilisation des fichiers «LAS» dans des logiciels très répandus comme Microstation ou ArcGIS d'ESRI.

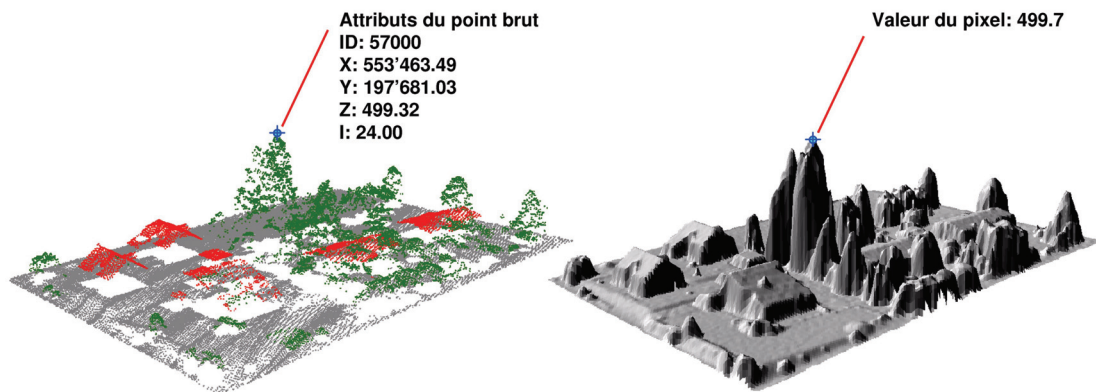


Figure 1.16. Comparaison, dans une même perspective, entre un extrait de données LiDAR vecteur (à gauche) et raster (à droite). Le modèle vecteur présenté se compose de 54'882 points bruts pour une surface de 8'250 [m²], soit une densité d'environ 6.5 [pts/m²]. Le modèle raster a une résolution spatiale de 50 [cm]. Source de données: MNS; © SITN (www.ne.ch/sitn).

1.8. ERREUR DE LA MESURE

1.8.1. SOURCES D'ERREURS

La précision de la mesure d'un point LiDAR dépend de trois principales sources d'erreur (Schaer et al., 2007):

1. les erreurs lors de la détermination directe des paramètres d'orientation (géoréférencement direct);
2. les erreurs propres au capteur laser lors des mesures de distance;
3. les erreurs relatives aux changements de géométrie lors du processus de balayage des impulsions.

La détermination de la position et de l'attitude exacte du capteur dépend de la précision des données DGPS (constellation des satellites durant le vol (PDOP), position de la station de référence), de la précision des mesures inertielles, du calibrage du système (les excentricités angulaires ou *boresight angles* et les excentricités linéaires ou *lever arm*) et de la précision du système de balayage (précision de la direction des impulsions). En règle générale, la position du capteur est assurée avec une précision de 5 à 15 [cm]. La précision des mesures DGPS dépend étroitement de l'exactitude avec laquelle les ambiguïtés sont résolues. La précision de l'orientation du système dépend quant à elle directement de la qualité des centrales inertielles utilisées. L'impact des erreurs d'orientation augmente avec la hauteur de vol. Selon la qualité de la centrale inertielle, on peut s'attendre à une erreur de la mesure de roulis (*roll*) et de tangage (*pitch*) comprise entre 0.004° à 0.02°. L'erreur de lacet (*heading*) est environ le double de celle de roulis (Katzenbeisser, 2003).

La précision de la mesure de distance laser dépend de l'angle d'incidence des impulsions et de la précision de la mesure de l'intervalle de temps que met l'impulsion pour effectuer un aller-retour entre la plate-forme et le terrain. La valeur de cet intervalle dépend elle-même de la capacité du capteur à détecter la même position relative sur l'impulsion émise et reçue (alignement du pulse émis et reçu). A titre indicatif, dans le cas d'un terrain plat en dur, la précision de la détection de l'impulsion retour est estimée à 10 à 15% du temps de parcours. Ainsi, pour une durée d'impulsion de 10 [ns], la durée du segment croissant est approximativement d'1 [ns], ce qui correspond à une précision de la mesure de distance de 1.5 à 2.5 [cm] (Baltasavias, 1999a). On peut encore citer comme autres facteurs influençant la précision de la mesure de distance:

- l'amplitude du signal retour, qui est fonction notamment de la hauteur de vol, de l'angle d'incidence des impulsions et de la réflectivité de la cible,
- l'imbrication des échos retours en raison de la structure verticale de la cible (en végétation ou en terrain accidenté),
- la présence de cibles multiples à l'intérieur de l'empreinte au sol,
- les conditions atmosphériques (pression, température, humidité).

Pour les systèmes à miroirs oscillants, une erreur sur la mesure de l'angle du miroir modifiera l'aspect géométrique de la bande, en introduisant notamment des décalage en planimétrie et en altimétrie des points situés en bordure de bande. Les conditions sont similaires pour les systèmes à miroirs rotatifs. Un calibrage de l'orientation de chacune des faces du miroir est ainsi nécessaire. Ces erreurs sont absentes des données acquises à partir d'un système à fibre optique (Katzenbeisser, 2003).

L'impact de l'angle d'incidence de l'impulsion et du diamètre de son empreinte au sol sur la précision de la mesure est plus délicat à estimer quantitativement, car cela nécessite une connaissance a priori de la pente et de l'orientation du terrain. Schaer et al. (2007) proposent une approche novatrice qui permet une estimation de l'angle d'incidence de l'impulsion directement sur la base du nuage de points bruts. Pour ce faire, la normale du terrain local est approximée par l'analyse des valeurs normales (*eigenvalue*) de la matrice de covariance calculée sur le voisinage des points. En connaissant la normale du terrain (n) et la direction de l'impulsion (l), l'angle d'incidence (α) se calcule par l'équation:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{l \cdot n}{|l| \cdot |n|}\right) \quad (1.16)$$

L'effet de la divergence du faisceau laser se traduit par une tache au sol de plusieurs centimètres à quelques décimètres de diamètre selon la hauteur de vol. Cette information fournit un ordre de grandeur sur la précision planimétrique d'un système. L'erreur planimétrique DXY est fortement dépendante de la topographie du terrain et de l'angle d'incidence des impulsions au moment de la mesure. Baltsavias (1999b) estime que l'erreur planimétrique est de 2 à 5 fois plus importante que l'erreur altimétrique, alors que la campagne Optech Inc évalue l'erreur planimétrique de son capteur ALTM 3100 à 1/2000 de l'altitude de vol (Morsdorf et al., 2006).

De la même manière que pour l'erreur planimétrique, l'erreur altimétrique DZ augmente significativement lorsque l'angle d'incidence des impulsions, la hauteur de vol et la pente locale du terrain augmentent. La relation entre les erreurs planimétriques et altimétriques en fonction de la pente i est donnée par:

$$\Delta Z = \Delta XY \cdot \tan(i) \quad (1.17)$$

Ainsi, en terrain pentu, la précision altimétrique varie de manière significative à travers la fauchée (figure 1.17).

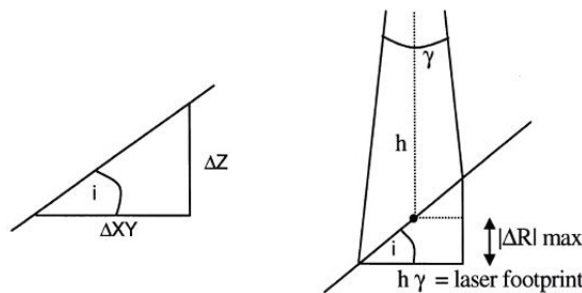


Figure 1.17. Influence de la pente sur la précision de la mesure (d'après Baltsavias, 1999).

Les précisions nominales fournies par les constructeurs de systèmes LiDAR sont généralement annoncées inférieures à 15 [cm] en altimétrie (cette valeur augmente avec la hauteur de vol) et inférieure à 40 [cm] en planimétrie. Selon Alharthy et al. (2004), l'incertitude altimétrique en terrain plat est de l'ordre de ± 15 [cm], alors que l'incertitude planimétrique est de ± 30 [cm] au centre de la fauchée (proche du nadir) et ± 60 [cm], soit près du double, en bordure de fauchée.

L'étude originale de Glennie (Glennie, 2007), qui repose sur une analyse d'erreur rigoureuse de l'équation de géoréférencement, s'intéresse à quantifier la précision verticale et horizontale de différents systèmes (terrestre et aéroporté). Elle présente notamment l'originalité d'analyser les différentes contributions (en pourcentage) des erreurs relatives à la centrale inertielle (IMU), aux excentricités angulaires (boresight angles), à la portée (range), à l'angles de scannage (scan angle) et aux excentricités linéaires (lever-arm)(Figure 1.18).

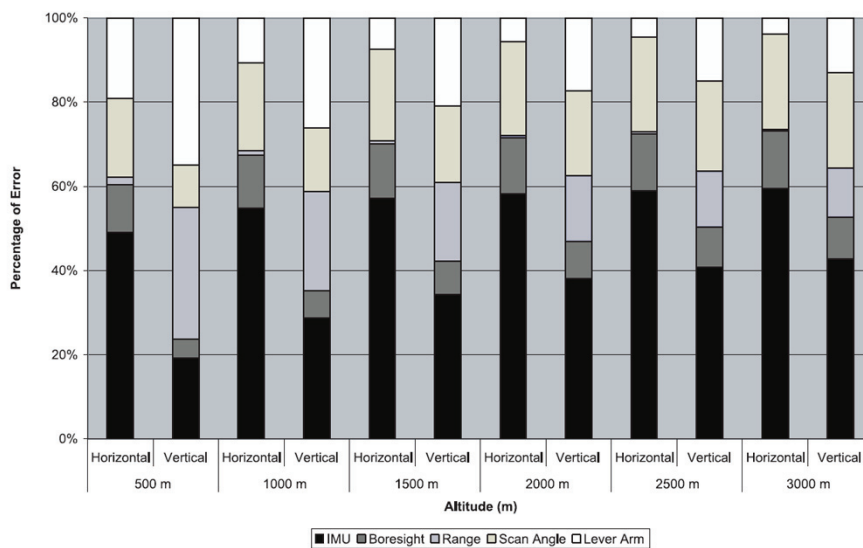


Figure 1.18. Contribution des erreurs (en pourcentage) pour un système LiDAR monté sur une plate-forme aéroportée (Applanix 510 IMU, Least Squares Boresight) (d'après Glennie, 2007).

Glennie démontre notamment que l'erreur planimétrique des mesures est nettement dominée (60% à 75% selon la hauteur de vol) par la combinaison des erreurs relatives à l'IMU et aux excentricités angulaires (attitude errors).

Pour compléter cette réflexion, ajoutons que l'étude menée par Schaer et al. (2007) a permis de calculer un indicateur de qualité (*Q-indicator*) qui renseigne sur la qualité individuelle de chaque point de mesure. Cet indicateur prend en compte la qualité du géoréférencement, de même que les variations de géométrie des impulsions laser propres au balayage. Les perspectives d'applications d'un tel indicateur sont multiples: amélioration de la classification automatisée et manuelle des données, optimisation de l'ajustement des lignes de vol ou encore amélioration de la métadonnée.

1.8.2. PRÉCISIONS RELATIVE ET ABSOLUE

La précision relative de la mesure altimétrique LiDAR (ou bruit) peut s'estimer par l'écart-type d'un échantillon de valeurs. Une analyse de données issues du système LiDAR ALTM 3100 (données du canton de Genève) sur une surface dure (terrain de basket avec un revêtement en béton) et un terrain de football en herbe a permis de démontrer que le bruit de la mesure varie entre 10 [cm] (9,7 [cm]) (figure 1.18) pour le terrain en dur et 16 [cm] (15,8 [cm]) pour le terrain de herbe (figure 1.20):

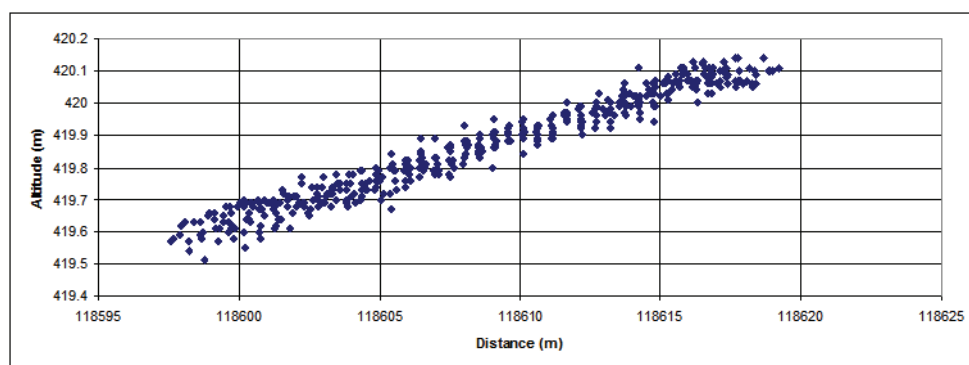


Figure 1.19. Bruit des données LiDAR (ALTM 3100) sur le terrain en dur (242 mesures LiDAR - écart-type: 9.7 [cm]).

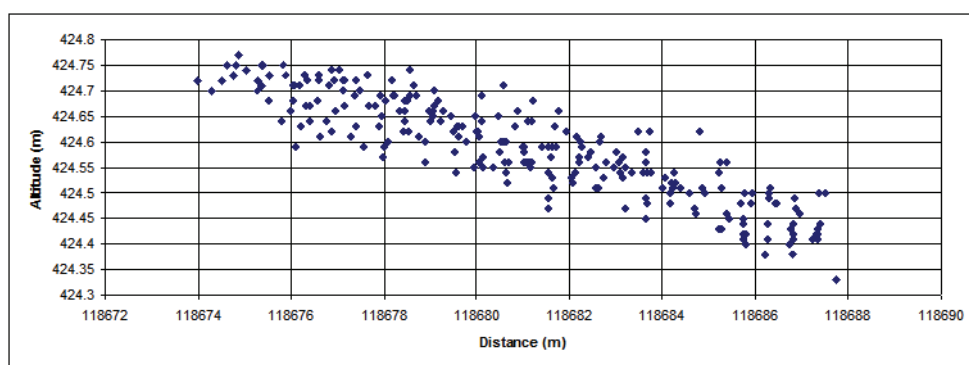


Figure 1.20. Bruit des données LiDAR (ALTM 3100) sur le terrain en herbe (456 mesures LiDAR - écart-type: 15.8 [cm]).

La précision absolue peut être estimée en comparant les altitudes LiDAR avec l'altitude réelle du terrain mesurée in situ par un GPS à haute précision (RTK). Cependant, la correspondance exacte entre un écho LiDAR et une mesure de terrain GPS est pour ainsi dire impossible au vu de l'erreur planimétrique et de la distribution aléatoire des points de mesure LiDAR. On procède donc à une interpolation du modèle pour assurer la superposition des deux jeux de données. Une analyse, réalisée sur le canton de Neuchâtel, a permis de comparer les valeurs altitudinales de points bruts LiDAR (acquis avec le système Scan2map - vol 2005) avec des mesures de référence: points fixes de la mensuration officielle (PFP3) et mesures GPS-RTK de points en pâturage. Cette simple analyse révèle une précision de 2.1 [cm] sur les surfaces dures et 13.5 [cm] sur le pâturage (tableau 1.2). Ces résultats sont confirmés par d'autres recherches (Wehr & Lohr, 1999, Hyypä et al. 2000, Skaloud & Vallet, 2002).

	Surfaces dures	Pâturages
Nombres de points de mesures	188	12
dz moyen	-0.021 [m]	0.135 [m]
dz minimum	-0.48 [m]	0.023 [m]
dz maximum	-0.48 [m]	0.268 [m]
Ecart moyen	0.156 [m]	0.135 [m]
Ecart-type	0.155 [m]	0.067 [m]

Tableau 1.2. Précision absolue des mesures altimétriques LiDAR (système Scan2map; hauteur de vol: 250 [m]).

En complément, le tableau 1.3 présente les résultats d'une étude plus approfondie qui informe sur la précision relative et absolue (RMS [m]) des données issues du système Scan2map en fonction de l'homogénéité du terrain (Skaloud et al., 2005).

Surface	Précision-RMS [m]	
	relative	absolue
Route	0.03	0.06
Neige	0.06	0.10
Prairie	0.05	0.09
Végétation	0.09	0.14

Tableau 1.3. Précisions absolue et relative des données issues du système Scan2map pour différents types de surface (d'après Skaloud et al., 2005).

1.9. PLANIFICATION D'UN VOL

Parfois sous-estimée, la planification d'un vol laser nécessite une préparation minutieuse afin de déterminer le meilleur compromis entre les paramètres inhérents au système LiDAR à disposition et ceux relatifs à la topographie du site d'étude. Il s'agit notamment d'obtenir un recouvrement optimal de la zone d'étude, tout en assurant une réflexion suffisante du signal et une densité de points bruts conforme aux besoins. Ce dernier paramètre dépend principalement de la hauteur de vol, de la vitesse de la plate-forme et de la fréquence des impulsions laser. La direction et le recouvrement entre les lignes de vol doivent être judicieusement choisis afin d'obtenir une distribution aussi homogène que possible des points de mesure et garantir un calibrage optimal entre les lignes de vol adjacentes.

Les systèmes LiDAR appartenant à la catégorie des systèmes dits actifs, contrairement à la photographie aérienne, ne dépendent pas de la luminosité ambiante. En d'autres termes, il est tout à fait possible de réaliser une acquisition de données LiDAR de nuit. La période (saison) à laquelle le vol est réalisé va avoir une grande importance sur la richesse des données que l'on pourra déduire en forêt. En effet, pour obtenir une qualité optimale du MNT, et donc suffisamment de points au sol, il est impératif de voler lorsque les feuillus ont perdu leurs feuilles (en hiver), tout en se gardant de voler lorsque l'enneigement est trop important. En revanche la qualité du MNS sera dégradée par le manque d'informations (retours) sur la canopée. A l'inverse, un vol en été permet l'acquisition d'un maximum de points sur le sommet de la canopée, ce qui est favorable pour dériver, par exemple, des hauteurs de peuplement. Notons qu'une couverture dense se traduit par une pénétration atténuée de l'impulsion à travers la végétation et donc par une dégradation de la qualité du MNT. Sachant que la réalisation de deux vols à des saisons distinctes se justifie difficilement financièrement, une option intermédiaire est souvent choisie avec des vols au printemps ou en automne. En milieu forestier, où le terrain change habituellement très peu, une solution judicieuse consiste à réaliser une fois un MNT précis en hiver, puis d'effectuer les vols suivants en été afin de mieux cerner le dynamisme et la croissance de la végétation.

1.10. SYSTÈMES EXISTANTS (PULSE & FULL WAVEFORM)

Il existe des systèmes LiDAR terrestres, satellitaires ou aéroportés.

Les lasers positionnés au sol offrent une excellente précision de mesure (de l'ordre du centimètre), mais se limitent généralement à des études très locales (figure 1.21). Leurs principales applications concernent la modélisation de parois rocheuses (Bellian et al., 2005), d'édifices (Böhm et al., 2007) ou encore l'étude des secteurs forestiers à très grande échelle. On trouve d'ailleurs de plus en plus d'études qui couplent une acquisition LiDAR aéroportée avec des données LiDAR terrestres (Ruiz et al., 2004).

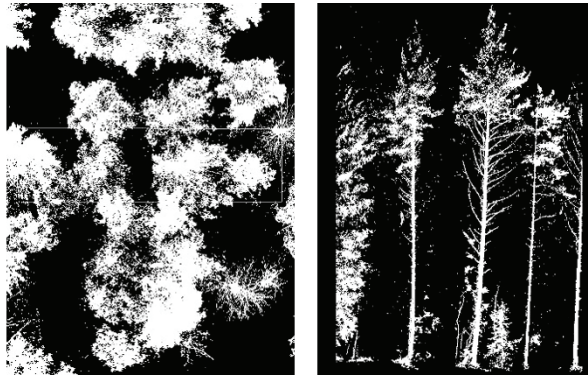


Figure 1.21. Représentation de données LiDAR terrestres: à gauche, une vue d'en haut d'un secteur forestier; à droite, la partie centrale du même secteur en vue de profil (source: projet EuroSDR: «Tree extraction»; web: www.eurosd.net)

Les systèmes embarqués sur des plate-formes satellitaires sont encore peu répandus. Citons tout de même le système GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) monté sur le satellite ICESat (*Ice, Cloud and land Elevation Satellite*) (figure 1.22). Ce système a pour objectif d'analyser la topographie de la couche de glace et ses changements dans le temps, les propriétés des nuages et de l'atmosphère, de même que l'étude de la topographie du sol et des zones humides. Le signal enregistré dans le cas de la mission ICESat correspond à une onde réfléchiée discrétisée le long du rayon avec une résolution spatiale de 15 [cm].

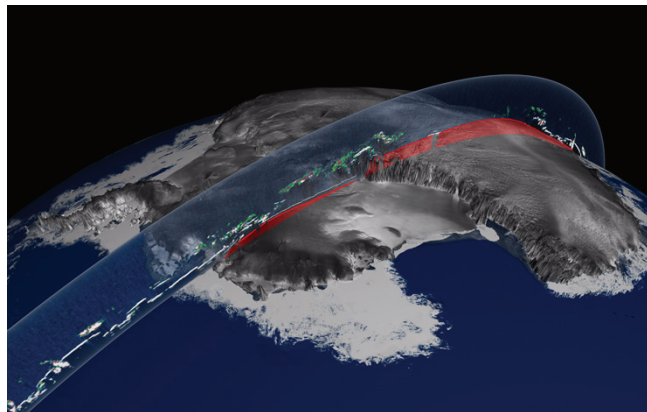


Figure 1.22. Système LiDAR GLAS monté sur le satellite ICESat (source: <http://www.csr.utexas.edu/glas/>).

Finalement, les systèmes LiDAR aéroportés constituent la classe principale qui regroupe le plus grand nombre de capteurs différents. En parallèle aux systèmes laser à impulsion (*pulsed LiDAR*) décrits dans ce chapitre, les premiers LiDAR à échantillonnage d'amplitude commerciaux sont apparus que récemment sur le marché, à savoir dans les années 2004 (Mallet & Bretar, 2008)(figure 1.23). L'introduction des premières unités commerciales est relativement récente, à savoir dans les années 2000-2006 (citons par exemple les systèmes Riegl LMS-Q560, ALS60 de Leica, Falcon III de TopoSys ou ALTM3100 d'Optech). Les premiers systèmes étaient tous expérimentaux. Citons en exemple trois projets développés par la NASA:

- Le système LVIS (*Laser Vegetation Imaging Sensor*) a permis de réaliser plusieurs recherches importantes dans le milieu forestier, dont la cartographie de la biomasse, la hauteur de la canopée et la structure du sous-étage en Amazonie en 2003.
- Le système SLICER (*Scanning Lidar Imager of Canopies by Echo Recovery*) qui permet notamment différentes études sur la mesure de la hauteur de la canopée (Harding, 2000).

Le système EAARL (*Experimental Advanced Airborne Research Lidar*) spécialement conçu pour l'étude des récifs coralliens, de la végétation des côtes et des plages de sable.

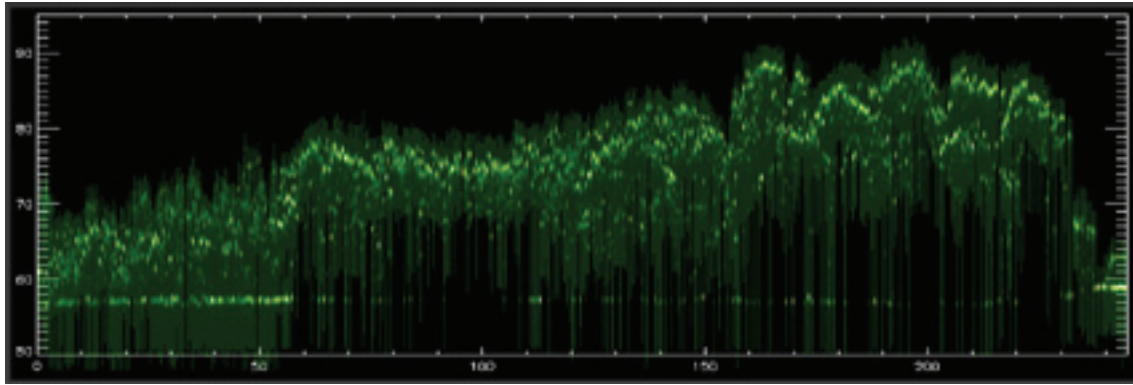


Figure 1.23. Profil en végétation (forêt de feuillus en été). Les données LiDAR sont issues du système «full waveform» LMS Q560 de RIEGL. (source: RIEGL, http://www.rali.boku.ac.at/fileadmin/_/H85/H857/workshops/3drsf forestry/presentations/8a.1-rieger.pdf)

L'amplitude et la largeur des pics du signal retour informent de certaines propriétés des cibles (rugosité, pente). En décomposant la forme d'onde en une somme de fonctions gaussiennes (ou chaque gaussienne correspond à un écho distinct), il est possible de dériver des caractéristiques de la cible sur la base de l'amplitude ou de la largeur de la fonction. De par leurs caractéristiques, ces systèmes sont fréquemment utilisés pour l'étude du couvert végétal.

En 1999, une importante publication a permis de regrouper les principaux systèmes et firmes existants (Baltsavias, 1999b). Une étude plus récente (Lemmens, 2007) détaille les caractéristiques de systèmes provenant de sept compagnies.

Fabricants	Systèmes
Leica Geosystems	ALS50-II; ALS60
Optech	ALTM Gemini
Riegl LMS	LMS-Q240i-60/LMS-Q240i-80
	LMS-S560-I/ LMS-S560-A
	LMS-Q560
TopEye	TopEye Mk II
TopoSys GmbH	Falcon III
	Harrier 56
	Harrier 24

Tableau 1.4. Exemple de différents systèmes LiDAR commerciaux.

La tendance actuelle va vers une amélioration de la performance des systèmes (fréquence d'échantillonnage, sensibilité des détecteurs, etc.), afin d'autoriser des hauteurs de vol toujours plus élevées (donc une largeur de fauchée plus grande) tout en garantissant une grande précision des données. En parallèle, l'apparition de systèmes combinant une caméra numérique tend à se généraliser. L'information spectrale est sans conteste un apport très riche pour bon nombre d'applications. L'augmentation des projets abordant la fusion des données LiDAR avec l'imagerie en est une confirmation.

1.11. DÉVELOPPEMENTS FUTURS

Les modèles altimétriques LiDAR se présentent comme une nouvelle alternative aux méthodes traditionnelles d'exploration du territoire. La très haute résolution (métrique ou supérieure), leur précision élevée, la complémentarité entre le MNS et le MNT, ainsi que la rapidité d'acquisition sont autant de qualités qui justifient l'utilisation du LiDAR pour un nombre croissant d'applications: urbanisme, foresterie, agronomie, archéologie, hydrologie, bathymétrie, etc.

Si le coût d'acquisition des données LiDAR était dissuasif il y a quelques années encore, le perfectionnement des systèmes et des logiciels dédiés au traitement des données, de même que l'augmentation de leur nombre sur le marché les rend aujourd'hui très compétitifs face aux méthodes dites traditionnelles comme la photogrammétrie. Alors qu'il n'existait qu'une seule compagnie qui vendait des systèmes LiDAR en 1996 et que les prestataires de service se comptaient sur les doigts d'une main, la fin des années 90 a été marquée par une forte augmentation des fabricants de systèmes complets ou de composants LiDAR principaux, et le nombre de firmes fournissant des services est passé à environ 40 à travers le monde (Baltasvias, 1999b). Cependant, la plupart des missions LiDAR sont encore optimisées pour la création d'un MNT. Il n'y a généralement pas ou peu d'informations clés permettant d'évaluer de manière optimale les données en végétation. Une bonne interprétation du MNS repose sur une bonne connaissance des métadonnées relatives:

- au vol d'acquisition: hauteur de vol, date, conditions météorologiques, etc.
- aux caractéristiques du système LiDAR exploité: longueur d'onde de l'impulsion, nombre d'échos enregistrés, etc.

Ajoutons que les données issues de systèmes LiDAR à échantillonnage d'amplitude (full waveform) offrent un meilleur contrôle de l'extraction des échos et permettent ainsi une meilleure description de la structure 3D en végétation et du sol. Selon la densité de la végétation, Chauve et al. (2007) démontrent la détection de 30% à 130% de points additionnels. Cette évolution a également pour conséquence de faciliter et d'améliorer le processus de classification des données. Sur la base d'une classification supervisée (par Séparateurs à Vaste Marge), il devient possible de prendre en compte les caractéristiques des échos pour finalement segmenter une zone urbaine en classes bâti, végétation, sol naturel et sol artificiel sur l'unique base des profils altimétriques (Mallet et al. 2008).

D'une manière générale, un effort doit être fait pour assurer une utilisation multi-thématique des données LiDAR. Il devient urgent de développer des standards et des spécifications pour l'acquisition des données (Reutebuch et al., 2005). Il s'agit de pouvoir répondre à des questions comme:

- Quels sont les paramètres de vol à respecter pour une acquisition optimale en milieu urbain?
- De quels paramètres faut-il tenir compte pour optimiser une acquisition sur un type de couvert forestier donné?

1.12. SYNTHÈSE DU CHAPITRE

Les systèmes LiDAR aéroportés offrent la possibilité d'acquérir rapidement et sur de vastes surfaces des informations à haute résolution en altimétrie terrestre. Ils permettent d'exploiter séparément ou conjointement une représentation du sol ou de la surface du terrain. La grande précision planimétrique et altimétrique des données, ainsi que la vaste gamme d'outils informatiques pour les traiter, engendrent des moyens et des potentialités que la recherche met progressivement en lumière.

Affaire de spécialiste, la planification d'un vol laser nécessite une préparation minutieuse afin de déterminer le meilleur compromis entre les paramètres inhérents au système LiDAR à disposition et ceux re-

latifs à la topographie du site d'investigation. Il s'agit notamment de prévoir un recouvrement optimal entre les lignes de vol, afin d'assurer une distribution des points de mesure suffisante, aussi homogène que possible, et conforme aux besoins. Dans ce contexte, la hauteur de vol, la vitesse de la plate-forme et la fréquence des impulsions laser sont autant de paramètres déterminants. La date du vol est encore un paramètre clé dont il faudra tenir compte pour garantir une couverture optimale des objets survolés. Malgré le fait que l'impulsion laser soit très peu divergente (0.30 à 4.5 mrad pour la majorité des systèmes), le diamètre de la tache au sol de l'impulsion laser peut varier de quelques décimètres à plus d'un mètre selon la hauteur de vol. Il est ainsi possible qu'une unique impulsion rencontre différents obstacles avant d'atteindre le sol et par conséquent plusieurs réflexions pourront être détectées par le récepteur.

En forêt, thématique centrale de cette étude, une première réflexion se fera sur la canopée, les suivantes sur les arbres du sous-étage ou les branches basses et une dernière lorsqu'une partie de l'impulsion atteindra le sol. Cette propriété, qui constitue l'une des grandes forces de la technologie LiDAR aéroporté, apporte une information précieuse sur la structure verticale de la végétation. Avec la restitution photogrammétrique classique, seule l'expérience de l'expert photointerprète pouvait donner accès à cette information. De manière plus approfondie, le chapitre suivant se concentre spécifiquement sur les modalités d'interaction entre les impulsions laser et un couvert forestier.

RÉFLEXION DES IMPULSIONS LASER PAR UN COUVERT FORESTIER

Les modèles altimétriques LiDAR apportent une nouvelle manière de modéliser le couvert végétal. Leur précision et la diversité des caractéristiques de la forêt qu'ils sont en mesure de révéler dépendent de toute une série de paramètres propres à la topographie du site, à la structure de la végétation ou aux caractéristiques de la mission d'acquisition (hauteur de vol, système de balayage, densité des données, etc.). Le premier objectif de ce chapitre consiste à présenter et illustrer, à travers des exemples concrets, l'information qui est intrinsèquement contenue dans les modèles altimétriques LiDAR acquis en forêt. Il s'agit d'examiner les variables forestières que l'on est en mesure d'observer, et donc d'extraire, à l'échelle de l'arbre et du peuplement. Le second objectif s'applique à dresser un état des lieux sur les travaux relatifs à l'exploitation des modèles LiDAR pour la foresterie en Europe et dans le monde. Il s'agit de se faire une idée sur les voies d'intégration concrètes du LiDAR dans la gestion forestière à travers un bref état de l'art des travaux déjà réalisés par la communauté scientifique (Naesset et al., 2004; Carson et al., 2004; Reutebuch et al., 2005). Alors que les pays nordiques (Norvège, Finlande, Suède), le Canada, les USA et l'Australie se placent comme les initiateurs des principales recherches dans le domaine, le nombre des utilisateurs des données LiDAR pour les applications forestières ne cesse de croître.

2.1. COMPORTEMENT DES IMPULSIONS LASER EN FORÊT

La forêt est une formation végétale vivante dont la physionomie varie au gré du temps et des saisons. Comme toute formation végétale, elle est conditionnée aussi par plusieurs facteurs comme la latitude, l'altitude, la nature du sol ou le climat. Plus localement, la topographie du site, le mélange des essences ou encore la pratique de gestion, influencent significativement les aspects de la couverture forestière vue du ciel. Cela se traduit par des densités variables de canopée (forêt dense ou clairsemée) et des structures verticales plus ou moins complexes. L'ensemble de ces paramètres conditionne directement les modalités d'interaction des impulsions laser avec un couvert. La qualité et l'utilité du modèle dépend finalement d'une série de facteurs que l'on peut regrouper en deux classes:

1. Les facteurs déterminés par les caractéristiques du vol et par le système LiDAR utilisé:
 - **la densité des mesures**, qui dépend de la vitesse de vol, de la fréquence d'échantillonnage, du motif au sol et du potentiel à enregistrer plusieurs retours pour une même impulsion,

- **le diamètre de la tache au sol**, qui dépend essentiellement de la divergence du faisceau et de la hauteur de vol,
- **l'angle d'incidence des impulsions**, dont dépend en grande partie le coefficient de pénétration des impulsions à travers la couverture.

2. Les facteurs liés au contexte de l'étude sur lesquels on ne peut pas agir, mais dont il faudra tenir compte pour optimiser l'acquisition:

- **la topographie**,
- **le type de couvert**,
- **la date du vol**.

De ces paramètres dépend le potentiel d'un modèle LiDAR à distinguer individuellement les arbres isolés ou en peuplement, à identifier les structures forestières étagées, à détecter les trouées, ou encore à modéliser fidèlement le terrain.

2.1.1. MODÉLISATION DES ARBRES ISOLÉS

L'identification d'un arbre isolé et la recherche de certaines de ses variables dendrométriques (le volume de bois, le diamètre du tronc à hauteur de poitrine, la hauteur) repose principalement sur la densité des mesures LiDAR, sur le potentiel du système à enregistrer plusieurs retours pour une même impulsion et sur la saison du vol lorsque l'on est en présence de feuillus.

Les figures 2.1 et 2.2 permettent de comparer la représentation d'un conifère et d'un feuillu pour deux densités de points bruts différentes (2 [pts/m²] et 8 [pts/m²]). Si l'identification de l'arbre ne fait aucun doute pour les deux configurations, la plus haute résolution permet toutefois d'améliorer la reconnaissance des espèces grâce à une modélisation plus fine de la couronne.

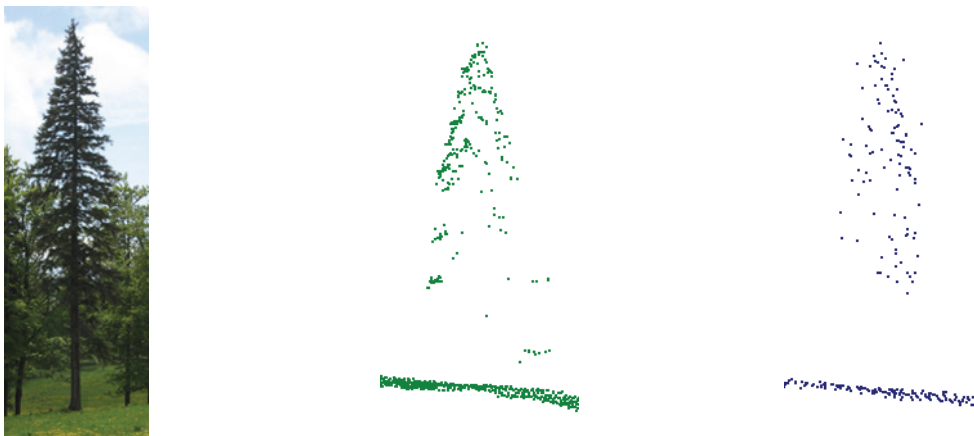


Figure 2.1. Représentation d'un conifère: à gauche, la photo prise au sol; au centre le nuage de points bruts d'une densité de 8 [pts/m²] (date du vol: juin 2005; système Scan2map); à droite, le même arbre modélisé par une densité de 2 [pts/m²] (issu d'un vol combiné: février 2001 et juin 2002; système TerraPoint ALTMS 2536). Source de données: MNS; © 2001 Données de la mensuration officielle (www.swisstopo.ch) & © SITN (www.ne.ch/sitn).



Figure 2.2. Représentation d'un feuillu: à gauche, la photo prise au sol; au centre le nuage de points bruts d'une densité de 8 [pts/m²] (date du vol: juin 2005; système Scan2map). A droite, le même arbre modélisé par une densité de 2 [pts/m²] (issu d'un vol combiné: février 2001 et juin 2002; système TerraPoint ALTMS).

Source de données: MNS; © 2001 Données de la mensuration officielle (www.swisstopo.ch) & © SITN (www.ne.ch/sitn).

Les arbres, comme tout autre objet vertical d'une certaine taille, représentent des obstacles plus ou moins perméables aux impulsions laser. Cela va générer des zones d'ombre dont l'ampleur augmente avec l'angle d'incidence des impulsions. Cet effet est donc très marqué en bordure de fauchée. La seule manière d'éliminer cet inconvénient consiste à assurer un recouvrement suffisant lors de l'acquisition en planifiant des lignes de vol croisées.

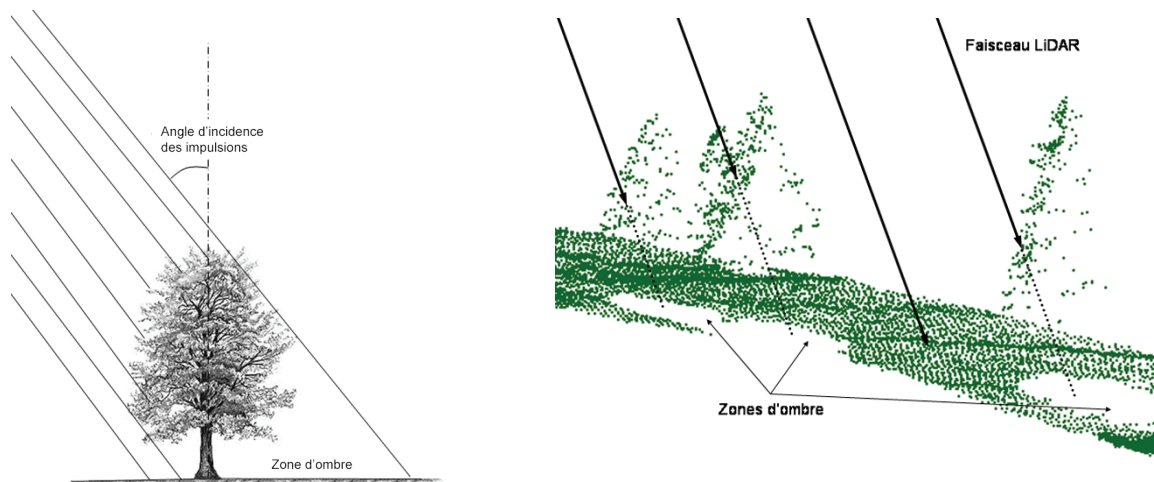


Figure 2.3. Illustration de l'effet de l'angle d'incidence des impulsions sur la distribution des points de mesures LiDAR. Source de données: MNS; © SITN (www.ne.ch/sitn).

La saison du vol est un paramètre très important lorsque les secteurs étudiés sont composés en majorité de feuillus. L'absence de feuillage réduit en effet considérablement le nombre de réflexions possibles sur la couronne au profit d'une densité de points élevée au sol. L'identification des essences, ainsi que la recherche de leurs caractéristiques dendrologiques devient très délicate pour ne pas dire impossible. Une proportion de mesures au sol trop importante par rapport aux échos en végétation peut biaiser le processus d'interpolation. Les conséquences directes sont une mauvaise modélisation de la couronne et une tendance à sous-estimer la hauteur de l'arbre.

2.1.2. MODÉLISATION DES ARBRES EN PEUPLEMENT

Les arbres en peuplement ont une interaction forte. Le mélange des couronnes et des essences, la présence de structures verticales complexes (forêts étagées), sont autant de paramètres qui complexifient l'interprétation d'un modèle altimétrique LiDAR en forêt. La probabilité qu'un arbre soit détecté dépend de sa distance aux autres arbres voisins les plus proches de même que de la hauteur relative entre ces arbres. Comme cela a été vu pour l'analyse des arbres isolés, les mêmes caractéristiques propres à la planification du vol et au site étudié influencent le potentiel d'exploitation du modèle LiDAR:

- le diamètre de l'empreinte au sol et la densité des mesures, qui dépendent de la hauteur de vol pour un système de mesure donné;
- le type de couvert;
- la date du vol.

En général, lorsque la hauteur de vol augmente, la proportion d'arbres correctement détectés et la précision de l'estimation de leur hauteur décroissent. L'effet est plus ou moins marqué en fonction des essences présentes. En effet, une faible densité de points bruts réduit la probabilité d'une bonne détection des sommets de conifères. Cela se traduit généralement par une sous-estimation des hauteurs si l'on associe directement le retour LiDAR le plus élevé d'un houppier à la mesure de hauteur de la cime correspondante telle qu'effectuée in situ. En revanche, la forme plus arrondie des feuillus les rend moins sensibles à ce phénomène. Le processus inverse se passe pour la délimitation des couronnes. Alors que la forme conique des résineux permet une bonne individualisation des individus formant la canopée, l'imbrication des couronnes de feuillus, généralement plus larges, rend leur délimitation très complexe. Si une petite empreinte au sol peut favoriser la détection des sommets des arbres dans les forêts denses, où la distance entre les individus est petite, le calcul des hauteurs et des diamètres de couronne n'est pas affecté significativement par la taille de l'empreinte au sol de l'impulsion (Persson et al., 2002).

Selon le type de couverture forestière (densité des arbres, âge et espèces présentes), la détection des arbres individuels d'un peuplement donné est plus ou moins aisée. Une forêt de conifères uni-stratifiée est un cas presque idéal qui présentera un taux élevé d'arbres correctement détectés. Les forêts à deux étages ou les forêts jardinées posent le problème de la mauvaise détection des arbres masqués par la strate dominante. Enfin, les couverts très denses laissent peu ou pas du tout pénétrer les impulsions laser à travers la canopée. Il en résulte un MNT de mauvaise qualité, donc une exploitation limitée du modèle LiDAR. Ackerman (1996) estime le taux de pénétration de 24 à 29% pour les conifères et 22 à 25% pour les feuillus en été. Il s'agit de valeurs moyennes indicatives qui varient passablement selon certaines caractéristiques locales.

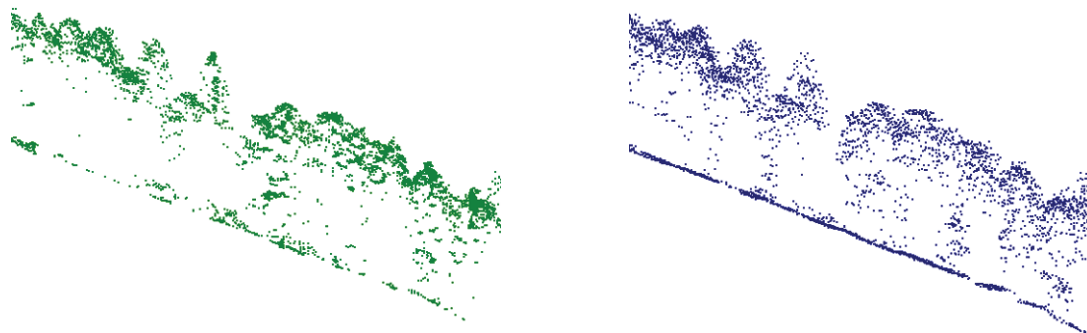


Figure 2.4. Comparaison de deux profils en forêt mixte (longueur: 80 [m]; profondeur: 6 [m]). A gauche (en vert) le nuage de points bruts d'une densité de 6 [pts/m²] (date du vol: juin 2005; système Scan2map). Le profil se trouve en bordure de l'unique fauchée. La densité de points au sol est très faible (0.2 à 0.5 [pts/m²]) à cause notamment de la couverture dense de la futaie et du grand angle d'incidence des impulsions. A droite (en bleu), le même profil avec une densité de 4 [pts/m²] (les données sont issues de la combinaison de deux vols: février 2001 et juin 2002, ce qui explique la bonne qualité du MNT; système TerraPoint ALTMS). Source de données: MNS; © 2001 Données de la mensuration officielle (www.swisstopo.ch) & © SITN (www.ne.ch/sitn).

En peuplement, le résultat de l'analyse de la distribution verticale des points bruts à travers des profils s'avère être une information riche pour l'identification des structures forestières. Notons qu'un angle d'incidence des impulsions élevé signifie que le chemin à parcourir à travers la végétation avant d'atteindre le sol est plus long. L'augmentation des obstacles le long du trajet réduit significativement la proportion des échos sur le terrain et ainsi altère la qualité du MNT. Le densité des branchages et du feuillage à traverser varie considérablement en fonction des essences et évolue avec les saisons (Holmgren, 2003; Pyysalo, 2006). Lorsque le taux de pénétration de l'impulsion est suffisant, la végétation du sous-bois ressort très nettement. La reconnaissance des strates inférieures est encore facilitée par l'utilisation des systèmes LiDAR-multi-retour. La figure 2.5 illustre la distinction entre une jeune futaie unistratifiée et une futaie étagée sur la base de profils dans le nuage de points bruts, alors que l'orthophoto n'autorise pas une telle discrimination.

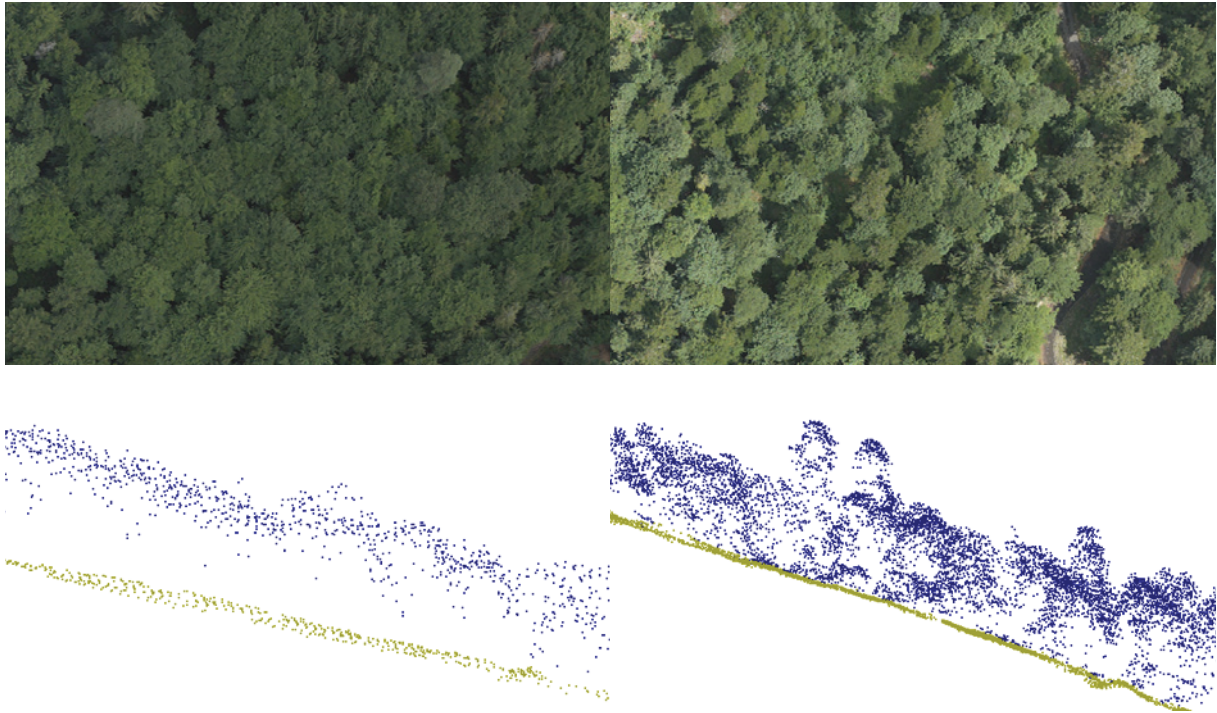


Figure 2.5. Comparaison de deux profils (longueur: 120 [m]; profondeur: 10 [m]). A gauche, un profil à travers le nuage de points bruts (d'une densité de 1 [pt/m²]) dans une jeune futaie. A droite, le même type de profil dans une futaie étagée (densité du nuage de points bruts de 4 [pts/m²]). La variation de densité est due à un recouvrement entre deux fauchées. Les données sont issues de la combinaison de deux vols (février 2001 et juin 2002) effectués avec le système TerraPoint ALTMS.

Source de données: MNS, orthophoto; © 2001 Données de la mensuration officielle (www.swisstopo.ch) & © SITN (www.ne.ch/sitn).

Le mécanisme d'acquisition qui consiste à balayer les impulsions laser perpendiculairement à la trajectoire de vol génère une distribution aléatoire des mesures sur le territoire. La force des modèles LiDAR à modéliser fidèlement la topographie et les objets de surface repose donc avant tout sur leur capacité à collecter une quantité considérable de données. L'illustration suivante résume schématiquement les principaux cas de figure que l'on rencontre lors d'une mission d'acquisition en forêt. La réflexion porte sur un système LiDAR à impulsion. Afin de mieux se rendre compte de ce qui est concrètement observable ou plus difficilement observable, six cas de figures sont présentés (d'après Suarez et al., 2005b).

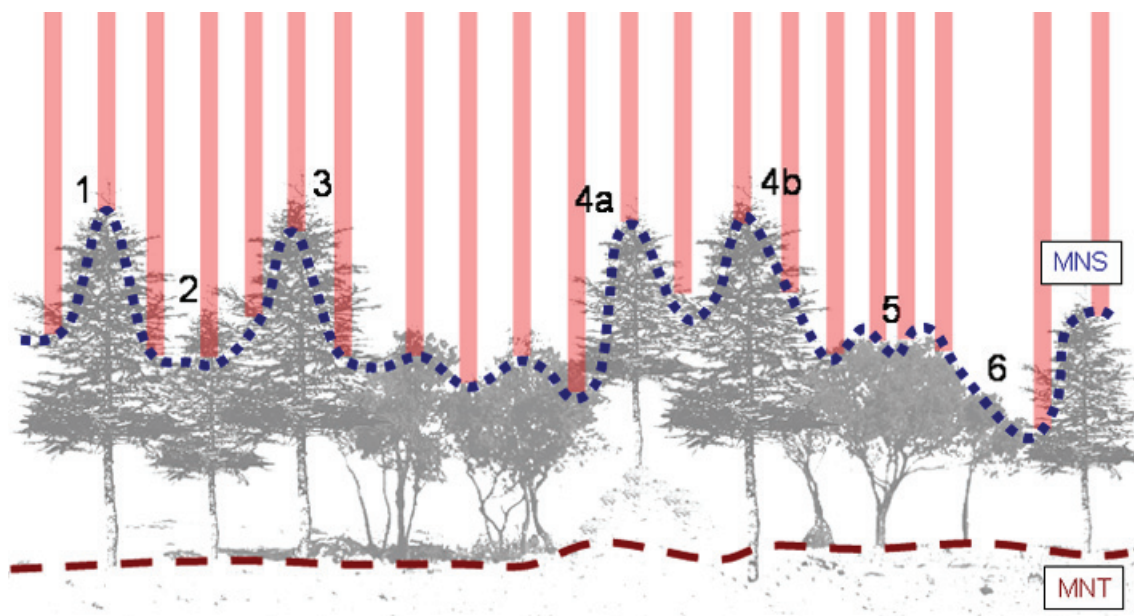
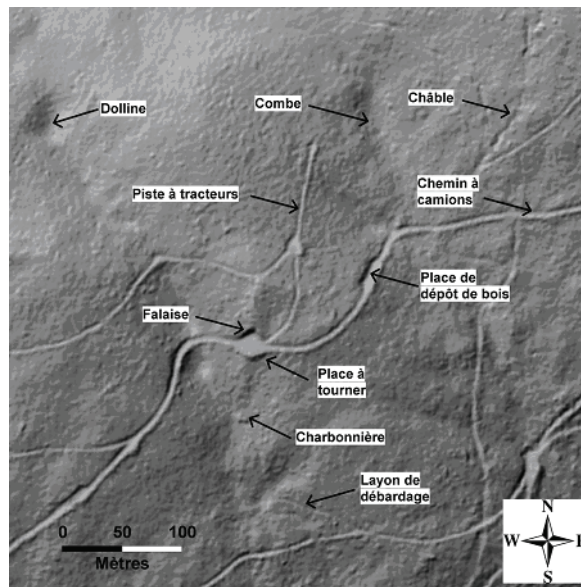


Figure 2.6. Schéma résumant l'acquisition d'un modèle laser en forêt, (d'après Suarez et al., 2005b).

- Cas 1: l'impulsion laser tombe sur le sommet de l'arbre. La précision de la hauteur mesurée est élevée, à condition bien sûr que le MNT soit de qualité.
- Cas 2: de petits arbres entourés par des individus plus grands sont ignorés étant donné que leurs sommets sont mélangés aux échos des couronnes voisines.
- Cas 3: le sommet de l'arbre est manqué (ou l'impulsion retour trop faible pour être détectée) ce qui amène une sous-estimation de la hauteur. Ce cas est le plus fréquent.
- Cas 4: une densité insuffisante de mesures sur le terrain altère la qualité du MNT (lissage du micro-relief) et peut ainsi conduire à une sur-estimation (4a) ou une sous-estimation (4b) de la hauteur de l'arbre.
- Cas 5: des échos à des hauteurs variables pour une même couronne sont détectés. Cette configuration, qui génère la détection de plusieurs sommets pour un seul arbre, se rencontre plus généralement avec les feuillus.
- Cas 6: une densité insuffisante de mesures peut amener à ignorer complètement un arbre.

2.1.3. TOPOGRAPHIE SOUS LE COUVERT FORESTIER

La capacité des impulsions laser à pénétrer à travers les interstices de la canopée permet d'extraire une information sur la structure verticale de la forêt ou encore de calculer un MNT. Ce dernier peut révéler avec une grande fidélité une série d'éléments structurant le terrain en sous-bois. Hyypä et al. (2004) soulignent que la qualité des MNT LiDAR est fortement influencée par les caractéristiques et la complexité du site, et plus spécifiquement par la configuration et la pente du terrain, ainsi que la densité de la canopée. La première mise en valeur possible d'un MNT consiste à représenter le relief par un ombrage du modèle interpolé. La très haute résolution de ces modèles permet déjà de révéler de nombreuses caractéristiques géomorphologiques par une simple analyse visuelle (figure 2.7). Cette représentation fidèle du terrain permet d'identifier aussi de nombreux éléments géographiques d'orientation et d'organisation (Gachet et Junod, 2007, Reutebuch et al. 2003). La figure suivante illustre un MNT sous la canopée et les différentes caractéristiques du relief qu'il révèle. Une liste attenante, non exhaustive, énumère les exemples courants de structures observables:



- les chemins à camion
- les pistes à tracteurs
- les layons de débardage
- les places de dépôt de bois
- les places à tourner
- les replats
- les collines
- les talus
- les ruptures de pentes
- les chemins creux
- les ravins
- les marnières
- les carrières
- les fours à chaux
- les combes
- les dollines

Figure 2.7. MNT LiDAR sous la canopée, en représentation par ombrage. Données du canton de Neuchâtel (résolution spatiale de 1 [m]).

Source de données: MNT; © SITN (www.ne.ch/sitn).

Ces informations apportent une meilleure connaissance de la topographie en sous-bois, améliorent les connaissances géologiques et ainsi augmentent considérablement les connaissances des stations. Le MNT s'avère finalement d'un très grand apport pour la mise à jour des cartes forestières.

Il ne faut pas non plus oublier de mentionner les données dérivées du MNT qui offrent un complément d'information très riche et facilement accessible. Les principaux exemples sont:

- La carte des pentes.
- La carte des orientations.
- La carte des courbures.
- Les courbes de niveau.

2.2. POINT DE SITUATION DES TRAVAUX ACTUELS

En milieu forestier, les systèmes LiDAR permettent d'acquérir de manière robuste et rapide une information égale ou supérieure en précision aux méthodes conventionnelles. L'estimation de variables forestières à partir de données LiDAR est un domaine en plein développement. Ainsi, l'utilisation des données LiDAR pour des applications forestières tend à se généraliser dans beaucoup de pays et notam-

ment en Europe. De nombreuses recherches en Scandinavie ont déjà montré des résultats très bons et encourageants pour la mesure des hauteurs, du volume, et des surfaces terrières dans les peuplements de conifères (Naesset et al., 2004). L'idée d'extraire de l'information à l'échelle de l'arbre est née vers le milieu des années 90, grâce au perfectionnement des systèmes et à l'augmentation possible de la densité des mesures (Hyypä et al., 2004). Popescu et al. (2003) ont démontré que si les hauteurs d'arbres sont estimées avec des données LiDAR de faibles densités (env. 1 [point/m²]), il est difficile de mesurer précisément d'autres paramètres de la couronne, comme le diamètre, spécialement dans les forêts mélangées. Naesset et al. (2004) présentent deux directions pour l'inventaire forestier assisté par LiDAR:

- Les procédures d'inventaires basées sur des modèles altimétriques ayant des densités de points modérées (env. 1 [pt/m²]) pour l'estimation des variables à l'échelle d'un peuplement ou d'une unité de gestion de quelques hectares.
- La détection et les mesures de caractéristiques à l'échelle de l'arbre individuel, grâce à des données LiDAR de haute densité (de 4 à plus de 10 [pts/m²]).

La figure 2.8 donne un aperçu des variables forestières qui ont déjà fait l'objet de recherches concrètes par l'analyse des MNA LiDAR. Certaines propriétés de base comme la position des sommets, la hauteur du couvert et la délimitation des couronnes, sont dérivées directement du MNH. Toutes les autres variables en sont plus ou moins directement dérivées, comme par exemple: la surface terrière, le volume de bois, la structure verticale, la longueur de la couronne, le diamètre à hauteur de poitrine (DHP), la densité du boisé ou encore l'indice foliaire¹ (LAI: «Leaf Area Index»).

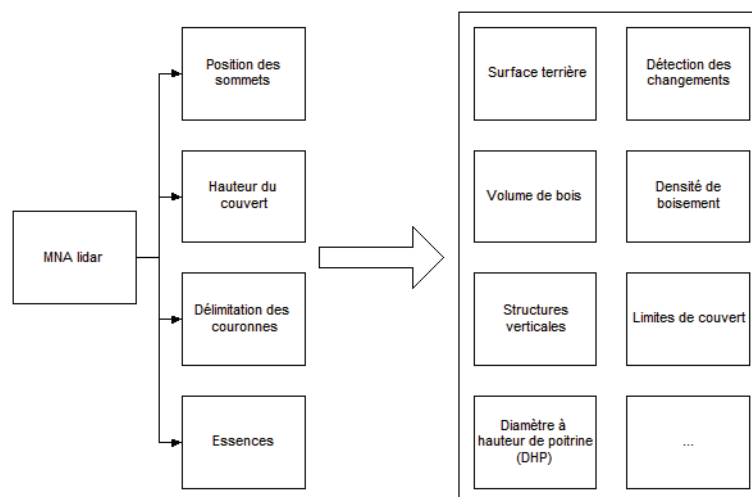


Figure 2.8. Schéma résumant les caractéristiques de base et autres variables dérivées des modèles LiDAR.
(Note: la reconnaissance des essences est très limitée sans l'apport d'une information spectrale)

Les conférences et autres manifestations regroupant les spécialistes du domaine sont de plus en plus nombreuses. La liste suivante donne quelques exemples de grands projets et manifestations organisés ces dernières années:

- Le projet HIGH-SCAN, qui s'est déroulé de 1998 à 2001, a proposé, pour la première fois, une étude à l'échelle européenne visant à dériver une information à l'échelle de l'arbre à partir des données LiDAR. Quatre nations ont activement participé au projet: la Finlande, l'Autriche, l'Allemagne et la Suisse. L'objectif du projet était d'explorer et tester l'intégration des images satellites à haute résolution et les données altimétriques laser pour l'inventaire forestier à moyenne et grande échelle (Hyypä et al., 2001b).

1. L'indice foliaire exprime le rapport entre la surface des feuilles et la surface de terrain occupée par la végétation. Ce rapport augmente au fur et à mesure de l'apparition de feuilles au cours du cycle de croissance et affecte le spectre de réflectance de la plante. L'indice foliaire est un indice de croissance végétale souvent utilisé en agriculture pour la révision des récoltes (Bonn et Rochon, 1996).

- Le projet NatScan, qui dura 3 ans, s'est achevé en octobre 2004. Le point d'intérêt central était la mise en place de méthodologies basées sur la technologie LiDAR pour la surveillance et le contrôle de problématiques environnementales (gestion des forêts, études d'impact). Ce projet avait notamment pour objectif le traitement des données LiDAR aéroportées, dans un premier temps, et terrestres, dans un second temps.
- Silvilaser 2006 était la sixième manifestation organisée dans le cadre d'une série de conférences internationales. Ce type de plate-forme est propice au partage d'informations et d'expériences pour les praticiens dans le domaine du LiDAR. Les thèmes traités se rapportaient aux inventaires forestiers, à l'extraction de variables à l'échelle de l'arbre, à la fusion des données LiDAR aéroportées à d'autres sources de données spatiales (images satellites à haute résolution, LiDAR terrestre, etc.), à l'évaluation des données multi-temporelles ainsi qu'aux applications écologiques en général. La conférence Silvilaser 2007 a été organisée en Finlande du 12 au 14 septembre.
- «Tree extraction» est un projet EuroSDR¹/ISPRS² auquel douze universités et bureaux provenant de onze nationalités différentes ont participé. Ce projet vise à évaluer la qualité, la précision et la faisabilité de méthodes d'extractions des arbres individuels à partir des données LiDAR à haute résolution et de l'imagerie. Cet objectif inclut une analyse de l'influence du choix de la méthode, de la densité des points de mesure et de l'apport de l'imagerie sur le résultat (www.eurosd.net). Les premiers résultats ont été présentés au Japon durant la conférence Silvilaser 2006.

2.3. SYNTHÈSE DU CHAPITRE

La qualité et la quantité d'informations qu'un modèle altimétrique LiDAR acquis en forêt est capable de fournir dépendent aussi bien des données techniques de la mission (type de système LiDAR, paramètres de vol), que du type de couverture forestière (densité des arbres, âge et espèces présentes). La force des modèles LiDAR à modéliser fidèlement la topographie et les objets de surface repose avant tout sur leur capacité à collecter une quantité considérable de données. Cette caractéristique conditionne la facilité avec laquelle il est possible de détecter les arbres individuellement ou d'identifier les structures forestières.

Grâce à l'augmentation du nombre de systèmes LiDAR commerciaux et à la disponibilité des données toujours plus importante, le développement des nouveaux modes de représentation et de traitement sont en pleine expansion. À l'échelle internationale, les applications du LiDAR en foresterie s'étendent rapidement et de nouveaux champs d'investigation s'ouvrent.

Dans la continuité des travaux actuels, il y a encore la nécessité d'élargir les recherches à de nouveaux champs d'investigation. La biodiversité et l'étude des habitats sont de bons exemples. Au niveau méthodologique, le couplage des données LiDAR avec l'imagerie semble se généraliser (St-Onge & Achaichia, 2001). On trouve d'ailleurs sur le marché de plus en plus de systèmes qui intègrent directement plusieurs capteurs. Alors que le LiDAR apporte une information très précieuse sur la structure du couvert, l'imagerie permet d'identifier de manière plus directe certaines caractéristiques comme les essences et offre une vue d'ensemble essentielle pour placer le contexte et détecter d'éventuelles particularités du site (constructions temporaires, véhicules, etc.).

1. European Spatial Data Research

2. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Terrestrial LiDAR systems

DESCRIPTION DES SITES D'ÉTUDE ET DES DONNÉES LiDAR EXPLOITÉES

3.1. INTRODUCTION

Cette recherche a pour but principal d'évaluer le potentiel des modèles altimétriques LiDAR pour répondre à un certain nombre de problématiques liées à la pratique forestière. Le choix des thématiques s'est naturellement imposé, suite aux contacts et aux opportunités de recherches qui se sont offertes pendant la durée de ce doctorat. Grâce à la collaboration d'ingénieurs forestiers, plusieurs sites d'étude appropriés ont ensuite été sélectionnés. Ces derniers, en plus de présenter des caractéristiques adaptées au thème abordé, disposent de données forestières de référence suffisamment récentes et bien documentées. Cette condition est essentielle pour permettre une validation des résultats. Au total, douze sites distribués sur les cantons de Neuchâtel, Vaud, Berne et Genève sont concernés.

Concernant la disponibilité des données de télédétection, nous avons pu bénéficier de la situation très avantageuse de la Suisse, qui possède un modèle altimétrique LiDAR et une couverture d'orthophotos sur la quasi totalité du territoire. Indépendamment à cela, l'acquisition de données LiDAR grâce à un système portatif hélicoptère a permis de compléter favorablement le matériel l'existant.

Dans un premier temps, ce chapitre a pour objectif de présenter brièvement le contexte forestier dans lequel s'insère la recherche, en précisant le cadre institutionnel et législatif. Les caractéristiques des différents sites forestiers concernés par les traitements sont ensuite résumées dans une section nommée «espace géographique». Dans un second temps, la source et la nature des données LiDAR utilisées sont présentées.

3.2. CONTEXTE FORESTIER

3.2.1. GÉNÉRALITÉS SUR LA FORÊT SUISSE

La forêt constitue un écosystème d'une extrême complexité à l'équilibre, duquel cohabitent les processus de rajeunissement et de sénescence. Elle dessine une mosaïque en perpétuelle évolution qui recouvre à peu près 30% de la superficie totale de la Suisse. A ce titre, elle présente une composante essentielle

de notre paysage. La forêt est un système dynamique vivant et complexe qui peut être caractérisé et décrit par divers critères, dont les principaux sont résumés dans le tableau 3.1:







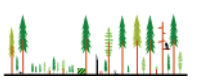
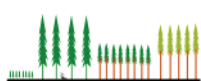
Forêt	Tropicale humide [de plaine]	Tempérée [montagnarde]	Boréale [subalpine]	de plantation
Conditions du milieu	Très favorables à la vie	Favorables à la vie	Peu favorables à la vie	Souvent favorables à la vie
Biodiversité	Extrêmement riche	Riche	Pauvre	Banalisation
Texture				
Trouées (clair) Stades matures (foncé)				
Structure (profil)	Enchevêtrée 	Irrégulière 	Régulière 	Généralement monostrate 
Sylvigénèse	La plus évoluée	Complexe	Simplifiée	Schématisée
Sous-bois	Inextricable	Luxuriant	Peu développé	Souvent absent
Résilience	Fascinante	Remarquable	Elevée	Diminuée
Multifonctionnalité	++++	+++(+)	++	+

Tableau 3.1. Description succincte des milieux forestiers (source: Junod, 2007).

Jusqu'à la deuxième moitié du XIXe siècle, la forêt était soumise à d'imprévoyantes déforestations et de brutales coupes rases. La population rurale laissait le bétail circuler librement. Dents et sabots occasionnaient des dommages considérables et empêchaient la régénération naturelle (Farron, 2004). A cette époque, la surface forestière estimée occupait le 17% de la surface totale de la Suisse. Fin du XIXe siècle, une prise de conscience amorce le début de la «sagesse forestière». Les premières réglementations limitant une exploitation abusive des ressources forestières apparaissent, en même temps que l'arrivée de nouvelles sources d'énergie en remplacement du bois comme l'électricité ou les combustibles fossiles. La pression exercée sur la forêt se fait moins forte. Les nombreuses vertus de la forêt sont maintenant reconnues. Les méthodes de gestion et de contrôle se sont adaptées à ce développement et des politiques forestières plus cohérentes ont vu le jour.

Au sens de la loi, est considérée comme forêt, toute surface recouverte d'arbres ou d'arbustes forestiers à même d'exercer des fonctions forestières. L'origine, le mode d'exploitation et la mention au registre foncier ne sont pas déterminants (LFo, art.1). L'ordonnance sur les forêts (OFO, art. 1) fixe encore des valeurs limites pour qu'une surface forestière soit reconnue comme boisée:

- surface comprenant une lisière appropriée: 200 à 800 [m²],
- largeur comprenant une lisière appropriée: 10 à 12 [m],
- âge des peuplements sur une surface conquise par la forêt: 10 à 20 ans.

Il incombe aux cantons de fixer les valeurs requises à l'intérieur de ces limites. Ajoutons que si un peuplement exerce une fonction sociale ou protectrice particulièrement importante, il doit être considéré comme forêt, indépendamment de sa surface, de sa largeur ou de son âge.

Alors que la surface forestière est en diminution de 0.2% par année au niveau mondial, on observe en Suisse une augmentation de 4.9% sur les 11 années ayant séparé le second inventaire national (1993-1995) du dernier recensement (2004-2007). La statistique de l'utilisation du sol en Suisse (source: Office

fédéral de la statistique, 1994) recense 1'004'531 [ha] de forêt dense, 79'301 [ha] de forêt clairsemée, 55'323 [ha] de forêt buissonnante et 113'124 [ha] d'autres surfaces boisées. La forêt clairsemée et autres surfaces boisées sont deux notions qui englobent principalement les pâturages boisés. Ces unités paysagères correspondent à des écosystèmes semi-naturels. Ils incluent des herbages pâturés et des peuplements boisés, dont la texture et la structure sont étroitement liées à une gestion mixte pastorale et forestière (Gallandat et al., 1995). Typiques de la chaîne jurassienne, les pâturages boisés représentent des paysages imprégnés de fortes valeurs naturelles et culturelles. La singularité de leur structure nécessite des modes de gestion adaptés pour assurer leur survie menacée par la fermeture forestière dans les zones les moins productives et par la disparition du boisé dans les zones exploitées intensivement. Même si on assiste toujours à une diminution de la rentabilité de la protection du bois, il y a une augmentation de la demande pour des forêts à buts récréatifs. La politique forestière suisse privilégie la pratique d'une sylviculture proche de la nature basée sur une gestion durable des forêts. Des efforts considérables sont faits pour la protection des surfaces forestières existantes, le reboisement protecteur et la gestion des forêts protectrices. D'une manière générale, on assiste à une réelle prise de conscience de la population, des partis politiques et des groupes intéressés vis-à-vis de l'importance de la forêt.

3.2.2. CADRE INSTITUTIONNEL ET LÉGISLATIF

L'organisation forestière se caractérise par une structure décentralisée. Le service cantonal des forêts relève directement du Département cantonal dont il est l'organe d'exécution. Il exerce les compétences que lui confère la loi, peut émettre des directives administratives et techniques, ainsi que des instructions et des recommandations. Les arrondissements forestiers sont, quant à eux, dirigés par les ingénieurs forestiers. Les principaux acteurs impliqués dans la structure organisationnelle de la foresterie au niveau fédéral et cantonal sont représentés dans la figure 3.1:

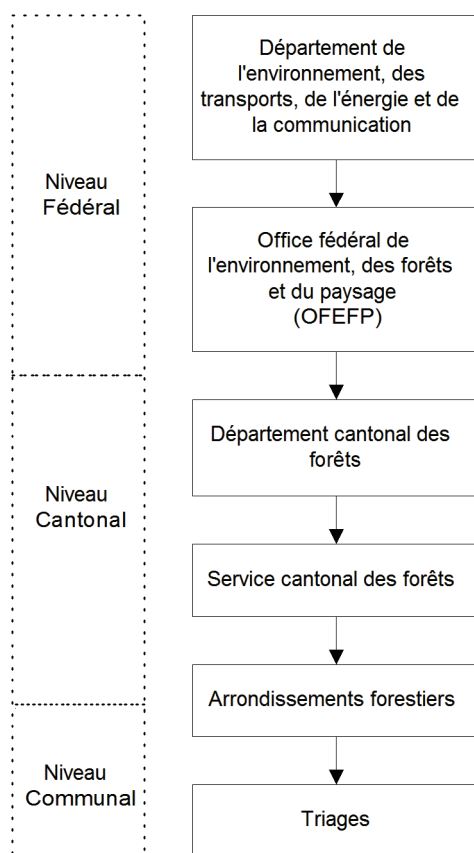


Figure 3.1. Système de la politique forestière au niveau de la Confédération et des cantons.

En s'adaptant progressivement aux nouveaux besoins et, en général, à de nouveaux rôles qui lui ont été

attribués, la législation forestière a beaucoup évolué durant les deux dernières décennies. La législation actuelle repose sur un ensemble de textes qui institue l'état de droit en milieu sylvestre. Cette législation a, notamment, intégré depuis longtemps les concepts du développement durable reconnus comme prioritaires dans le contexte actuel des changements climatiques (Farron, 2004).

3.2.3. QUELQUES REPÈRES DE LA LÉGISLATION FORESTIÈRE SUISSE

La Constitution fédérale énonce les principes suivants à propos de la forêt:

Art. 77 Forêts

La Confédération veille à ce que les forêts puissent remplir leurs fonctions protectrice, économique et sociale.

Elle fixe les principes applicables à la protection des forêts.

Elle encourage les mesures de conservation des forêts.

Plus concrètement, la loi fédérale sur les forêts du 4 octobre 1991 (LFo) présente les buts de la législation forestière fédérale à travers quatre points:

Art. 1 But

La présente loi a pour but:

- d'assurer la conservation des forêts dans leur étendue et leur répartition géographique;
- de protéger les forêts en tant que milieu naturel;
- de garantir que les forêts puissent remplir leurs fonctions, notamment leurs fonctions protectrice, sociale et économique (fonctions de la forêt);
- de maintenir et promouvoir l'économie forestière.

Elle a en outre pour but de contribuer à protéger la population des biens d'une valeur notable contre les avalanches, les glissements de terrain, l'érosion et les chutes de pierres (catastrophes naturelles).

En matière de planification forestière, la loi impose que chaque canton réalise et tienne à jour des documents dans lesquels sont au moins consignées les conditions de station, les fonctions de la forêt ainsi que leur importance (OFo, art. 18).

3.2.4. REPÈRES DE LA LÉGISLATION CANTONALE

Au niveau cantonal, la planification forestière est remplie par l'élaboration du plan d'aménagement forestier¹ (PAF) et du plan de gestion forestier (PG). Lorsque la situation l'exige, les plans sectoriels permettent encore de résoudre des problèmes d'aménagement ou de constructions particuliers. Les cantons sont chargés de la partie plus opérationnelle avec l'exécution des obligations décrites dans les lois cantonales. La législation fédérale étant relativement souple sur les moyens de mise en oeuvre, on assiste à une grande diversité dans les pratiques de gestion entre les cantons (notamment en matière d'aménagement forestier).

Le PAF est un instrument de coordination avec l'aménagement du territoire. Il définit la vocation des sites boisés, délimite les fonctions prioritaires, contient les principes en matière de gestion à long terme

1. On parle de plan directeur forestier dans le canton de Genève.

et fixe les objectifs sylvicoles pour un territoire déterminé. Le PAF a pour objectif d'assurer une gestion appropriée tout en réalisant le meilleur équilibre entre les réalités économiques, la fonction protectrice, le rôle social et les exigences écologiques.

Le PG est l'instrument clé de la conduite sylviculturale et de la gestion à l'échelle de la propriété forestière. Il est soumis à l'approbation écrite du propriétaire de la forêt ainsi qu'à la sanction éventuelle de l'autorité forestière. Une période de gestion d'une durée déterminée est ensuite fixée. Les finalités principales du PG sont les suivantes:

- Introduire les données descriptives du PAF.
- Garantir à long terme les fonctions de la forêt.
- Définir la quantité de bois qu'il est possible de récolter durablement.
- Planifier les détails de coupes de bois et des soins aux jeunes forêts.
- Instituer, pour autant que cela soit nécessaire, une ou plusieurs réserves forestières.

3.3. ESPACE GÉOGRAPHIQUE

La situation générale de l'ensemble des sites étudiés pour ce travail de recherche est présentée par la figure 3.2. Le tableau 3.2 apporte quelques informations complémentaires relatives à la situation, l'étendue et le type de couvert forestier. Les détails spécifiques à la thématique dans laquelle ils interviennent sont présentés dans les chapitres dédiés.

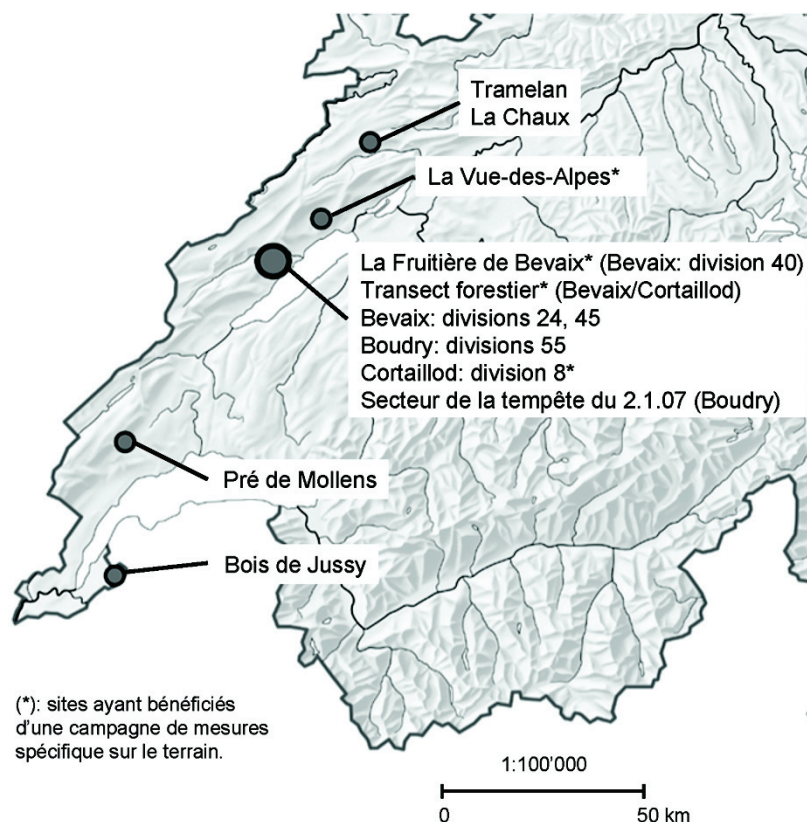


Figure 3.2. Situation générale des sites d'étude (source: © Office fédéral de topographie (www.swisstopo.ch)).

Sites	Canton	Coord. du centre Datum CH1903 Proj. suisse	Altitude moyenne [m]	Surface [ha]	Type de couvert	Problématique forestière
La Fruitière de Bevaix^a (Bevaix - division 40)	NE	X: 514392.58 Y: 199807.56	1295	1.4	Pâturage boisé	Localisation et hauteur des arbres individuels
Boudry - division 55	NE	X: 550792.30 Y: 201433.78	665	1	Futaie à dominance de feuillus	Localisation des arbres individuels en peuplement
Cortailod - division 8	NE	X: 551192.96 Y: 198914.82	725	0.8	Futaies	Hauteur des arbres individuels en peuplement
Bevaix - division 24	NE	X: 550593.43 Y: 197715.23	700	13.6	Futaie uniforme	Hauteur des peuplements Délimitation et description des peuplements
Bevaix - division 45	NE	X: 551556.91 Y: 197209.12	545	10.7	Forêt mixte dominée par le chêne	Délimitation et description des peuplements
La Vue-des-Alpes	NE	X: 556514.98 Y: 212878.59	1245	46.4	Pâturage boisé	Estimation de la surface des couronnes en fonction de la hauteur de l'arbre
Tramelan	BE	X: 571120.66 Y: 228550.60	1055	32.3	Pâturage boisé	Estimation du taux de boisement
La Chaux	BE	X: 571772.83 Y: 231920.57	1015	87.8	Pâturage boisé	Classification du taux de boisement
Pré de Mollens	VD	X: 514382.58 Y: 160062.66	1400	97.2	Pâturage boisé	Classification du taux de boisement
Transect forestier (Bevaix-Cortailod)	NE	X: 550768.11 Y: 199063.60	de 530 à 1300	395.2	Mélange de peuplements mixtes	Estimation du volume sur pied
Bois de Jussy	GE	X: 510547.09 Y: 121446.60	495	958.2	Chênaies	Estimation du volume sur pied
Boudry - secteur touché par la tempête du 2.1.07	NE	X: 552063.98 Y: 200767.75	610	219.1	Mélange de peuplements mixtes	Identification automatique des changements dans la structure du couvert forestier.

Tableau 3.2. Situation, étendue et type de couvert forestier pour les 12 sites d'études considérés par la recherche.

- a. Des variables spécifiques à l'échelle de l'arbre ont été mesurées sur ce site lors d'une campagne de terrain

Pour les trois grands thèmes présentés dans la section dédiée à la méthode de recherche (chapitre d'introduction), un certain nombre de sites ont été judicieusement sélectionnés afin d'illustrer et valider le plus objectivement possible les méthodologies développées. Les critères prépondérants pour la sélection de tels secteurs sont notamment la disponibilité des données altimétriques LiDAR, l'existence de données de terrain de référence ainsi que la nature et le mélange du couvert forestier. Dans quatre cas, des mesures supplémentaires sur le terrain ont été nécessaires pour compléter les données forestières existantes:

1. *La Fruitière de Bevaix*: mesures précises de la position, de la hauteur, ainsi que de plusieurs autres variables dendrologiques pour un échantillon de 92 arbres.
2. *Transect forestier (Bevaix - Cortailod)*: mesures précises de hauteurs d'arbre pour différents types de peuplements et réalisation d'un inventaire forestier complet pour deux secteurs d'un hectare chacun.
3. *Division 8 de la forêt communale de Boudry*: mesures précises de hauteurs d'arbre en peuplement.
4. *La Vue-des-Alpes*: mesures des diamètres de couronnes pour un échantillon représentatif d'arbres sur le pâturage boisé.

Le premier thème, qui étudie les caractéristiques fondamentales du couvert forestier, nécessite d'avoir pour référence des données précises à l'échelle de l'arbre. Le site de la Fruitière de Bevaix, grâce à la campagne de mesure, constitue un excellent candidat. Pour les analyses à l'échelle du peuplement, le choix s'est porté sur des divisions disposant de données récentes (proche de la date du vol LiDAR) et présentant des structures suffisamment complexes pour estimer la sensibilité des méthodologies développées.

Le second thème concerne une analyse et une description des peuplements plus directement en relation avec une thématique forestière particulière. Pour cette raison, le choix des sites s'est fait en collaboration étroite avec les forestiers directement concernés par la problématique visée. Il s'agit pour la plupart de secteurs pilotes, ayant déjà fait l'objet d'études.

Le site traité pour le troisième thème, l'étude diachronique, se rapporte à un vaste secteur de la forêt communale de Boudry ravagé par une forte tempête le 2 janvier 2007. Suite à cet événement, un survol LiDAR a été spécialement réalisé, afin d'estimer l'étendue des dégâts. Les résultats présentés dans cette recherche font suite à un travail de semestre réalisé par deux étudiants de l'EPFL (Ackermann & Stebler, 2007).

3.4. SOURCES ET NATURE DES DONNÉES LiDAR

Les données traitées dans cette partie expérimentale proviennent de trois systèmes distincts: le système Scan2map, le système ALTMS, et le système Optech 3100. Après une description générale de ceux-ci, des tableaux comparatifs résument leurs caractéristiques techniques et les propriétés des missions de vol à l'origine des données exploitées dans cette recherche.

3.4.1. SYSTÈME SCAN2MAP

Le système Scan2map (figure 3.3) est issu de la recherche dans les laboratoires de Photogrammétrie et Topométrie de l'EPFL, en collaboration avec SLF-Davos (Swiss Federal Institute of Snow and Avalanche Research), UW+R SA et VNR Electronique SA. Ce système est spécifiquement conçu pour la réalisation d'une cartographie précise et rapide de surfaces peu étendues (10 à 2000 [ha]) et souvent difficilement accessibles par voie terrestre. Destiné au suivi de catastrophes naturelles (avalanches, glissement de terrain, etc.), ce type de système est également adapté pour la cartographie de corridors (autoroutes, voies ferrées, lignes à haute tension) ou la mise à jour locale de modèles existants (Skaloud et al. 2005).

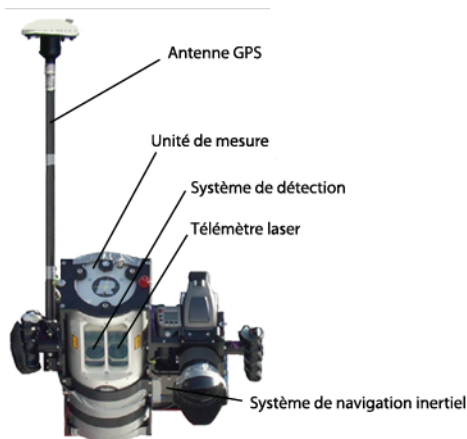


Figure 3.3. Système Scan2map.

Sa rapidité de déploiement tient au fait qu'il s'agit d'un système intégré portable regroupant en un seul et même dispositif: une caméra numérique haute résolution, un récepteur GPS, une unité de mesure inertielle (IMU) et un scanner laser (ALS). L'assemblage des différents capteurs permet, par effet de couplage, d'éliminer un grand nombre d'inconvénients liés aux technologies utilisées individuellement. Il ne nécessite pas de signalisation au sol (points de contrôle) et est plus ou moins indépendant du type d'hélicoptère. Sa structure compacte permet encore à l'opérateur, qui manipule le système à bout de bras, d'orienter le scanner laser afin de rester le plus perpendiculaire possible au relief. Cette action permet de

préserver une précision uniforme des mesures lorsque l'on se trouve en région montagneuse (figure 3.4). Pour une ligne de vol individuelle sur une surface dure, la précision absolue (RMS) des mesures est inférieure à 5 [cm] et la précision (RMS) relative (bruit) inférieure à 5 [cm] (Vallet & Skaloud, 2004; Skaloud et al. 2005).

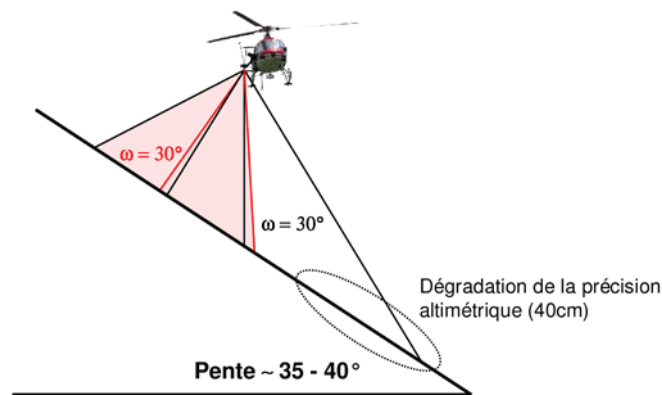


Figure 3.4. Système Scan2map. L'orientation du système perpendiculairement à la pente permet d'améliorer la précision des mesures en bordure de fauchée lorsque l'on se trouve en présence d'un relief escarpé.

Les données Scan2map à disposition pour cette recherche proviennent de deux différentes missions réalisées dans le canton de Neuchâtel. Ces vols ont été organisés et financés par le Système d'information du territoire neuchâtelois. La première acquisition a été réalisée en 2005 avec pour objectif l'évaluation des données altimétriques Scan2map en milieu forestier et viticole. Un transect d'environ 5 [km] de long à travers la montagne de Boudry a été survolé dans les deux sens afin d'obtenir une densité suffisante de points de mesures. Le calibrage des données LiDAR a été réalisée par le laboratoire de Topométrie de l'EPFL, alors que la classification du MNT s'est faite avec l'application TerraScan par le laboratoire de SIG.

La seconde acquisition, réalisée en 2007, a été initiée par un travail d'étudiants de l'EPFL (Ackermann et Stebler, 2007). Pour une étendue d'environ 200 [ha] sur la commune de Boudry, ils ont réalisé la planification du vol, l'acquisition ainsi que les traitements de calibrage et de classification des données.

PARAMÈTRES DE VOL DES MISSIONS SCAN2MAP

Paramètres	Premier vol	Second vol
Date de vol	juin 2005	avril 2007
Hauteur de vol	250 [m]	200 [m]
Densité des points	~ 4 [pts/m ²]	~ 6 à 8 [pts/m ²]
Fauchée	290 [m]	230 [m]
Empreinte au sol	0.70 [m] de diamètre	0.85 [m] de diamètre

Tableau 3.3. Paramètres des missions d'acquisition Scan2map.

Pour les deux vols, les données calibrées ont été transformées du cadre de référence WGS84 vers le cadre de référence national avant d'appliquer finalement la projection nationale (CH1903+, puis CH1903). La solution GPS étant exprimée dans le cadre ECEF WGS84, il convient de changer le datum et passer à l'ellipsoïde de Bessel (datum national). La solution est ensuite projetée de l'ellipsoïde sur un plan. Les altitudes sont finalement transformées en altitudes orthométriques à l'aide des logiciels dédiés (FINEL-TRA et HTRANS)¹.

1. Pour plus d'information: <http://www.swisstopo.ch/fr/basics/geo/system/lv95/>, octobre 2007.

3.4.2. SYSTÈME ALTMS 2536 TERRAPOINT

En 1999, l'Office fédéral de topographie (swisstopo) débuta, sur mandat de l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG), un projet afin d'actualiser les surfaces agricoles utiles (SAU) au travers de la mensuration officielle. Dans ce but, un modèle altimétrique LiDAR a été acquis sur la majorité du territoire suisse en dessous de 2000 [m] d'altitude, soit 31'800 [km²]. Certains cantons, comme Genève et Jura, n'ont pas fait partie du projet sachant qu'ils étaient déjà en possession d'un modèles altimétrique de qualité. Pour la planification des vols, le territoire concerné a été découpé en 5 régions (RE1 à RE5) (figure 3.5).

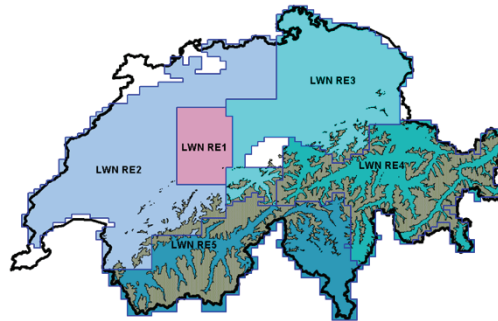


Figure 3.5. Découpage du territoire suisse en cinq régions d'acquisition (une couleur par région).
(Source: Office fédéral de topographie (www.swisstopo.ch))

Les sites étudiés dans cette recherche se trouvent tous dans la région RE2. Les données sont issues du système TerraPoint ALTMS 2536 (figure 3.6) et concernent les cantons de Berne, Fribourg, Neuchâtel et Vaud. Les vols de la zone RE2 ont été conduits à travers une coopération entre Swissphoto et TerraPoint LCC (Houston, Texas). Swisstopo a encore réalisé la classification des données (Luethy & Stengele, 2005). Afin de garantir une qualité suffisante et homogène des modèles générés, un processus méthodique de validation a été mis en place par swisstopo (Artuso et al., 2003). La précision altimétrique est d'environ 30 [cm].

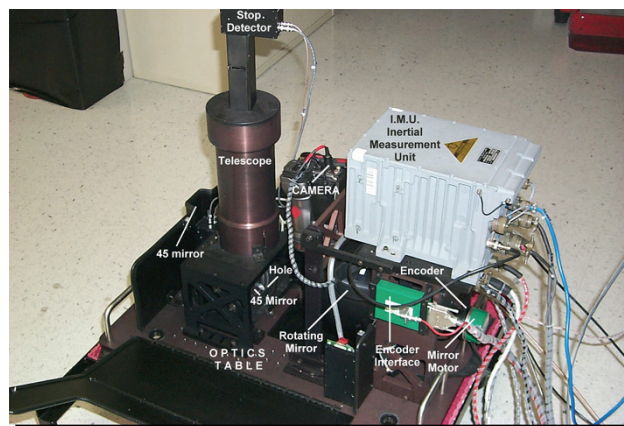


Figure 3.6. Système ALTMS 2536 (source: Swissphoto (www.swissphoto.ch)).

Deux précisions importantes méritent encore être apportées en relation avec la qualité de ces données. Premièrement, lors du processus de filtrage des données, un certain nombre de classes a été défini: sol nu, constructions, végétation, pont, ligne à haute tension, etc. Seules les trois premières classes sont mises à disposition des utilisateurs potentiels. Deuxièmement, les paramètres précis utilisés pour la classification du MNT ne sont pas connus. Cette lacune est susceptible d'amener à une mauvaise interprétation des données dans certains cas litigieux (falaises, secteurs escarpés et pentus, etc.).

PARAMÈTRES DE VOL DES MISSIONS ALTMS 2536

Il est important de rappeler que l'objectif principal de l'acquisition des données LiDAR dans le cadre du projet SAU est la mise à jour des données de la mensuration officielle. La qualité du MNT était une priorité. Les vols se sont donc principalement déroulés durant la période de repos de la végétation, tout en se gardant d'intervenir lorsque l'enneigement était trop important. Cette précision essentielle est à prendre en considération lorsque l'on traite les données LiDAR relatives à des peuplements de feuillus.

Secteur	Canton (n° carte nationale)	Date de la mission
Tramelan	Berne (1125)	2001
La Chaux Tramelan	Berne (1105)	2001
Pré de Mollens	Vaud (1221 & 1222)	1er vol: février/mars 2001 2ème vol: octobre 2002
Pré de Ballens	Vaud (1221)	1er vol: février/mars 2001 2ème vol: octobre 2002
Vue des Alpes	Neuchâtel (1144)	2001
3ème arrondissement ^a	Neuchâtel (1163 & 1164)	1er vol: janvier/février 2001 2ème vol: juin 2002

Tableau 3.4. Dates des vols LiDAR pour les différents sites concernés par les données ALTMS.

- a. Les données sur le 3ème arrondissement forestier comprennent les divisions de Bevaix, Boudry, Charcotet, ainsi que le site de la Fruitière de Bevaix.

Hauteur de vol	915 [m]
Densité des points	~ 1 [pt/m ²]
Fauchée	600 [m]
Empreinte au sol	1.10 [m]

Tableau 3.5. Paramètres généraux pour les missions ALTMS.

3.4.3. SYSTÈME OPTECH ALTMS 3100

Dans le cadre de la mise à jour de ses modèles numériques d'altitude LiDAR acquis en 2000, la direction cantonale de la mensuration officielle du canton de Genève (DCMO) a mandaté l'entreprise Swissphoto pour réaliser une nouvelle couverture LiDAR sur une région de 314 [km²] englobant la totalité du territoire cantonal. Les travaux de mensuration ont été effectués à l'aide du système Optech ALTMS 3100 (figure 3.7). L'essentiel des vols se sont déroulés durant le mois de mars 2005, après la période de gel, mais avant celle des crues.



Figure 3.7. Système Optech 3100. (© 2005, Optech Incorporated (www.optech.ca)).

La classification des données, réalisée par Swissphoto, a été réalisée à l'aide de l'application TerraScan. Il en résulte cinq classes:

1. Terrain (TER)
2. Végétation (VEG)
3. Bâtiments (BAT)
4. Ponts (PON)
5. Autres points: murs, lampadaires, clôtures, etc. (AUT)

Pour faciliter le traitement, le jeu complet de données a été découpé en tuiles de 1 [km²]. Pour chacune d'elles, un contrôle de qualité a permis d'éliminer les points erronés. Les précisions planimétrique et altimétrique ont également été contrôlées sur toute la région du projet grâce à des relevés terrestres. Après l'acceptation des produits dans le système CH03-GE/NF02, les données brutes ont été traitées avec l'algorithme Fineltra et projetées dans le système CH03-GE/NF02. Les tuiles sont finalement mises à disposition avec un découpage de 3 [km] par 3 [km].

PARAMÈTRES DE VOL DES MISSIONS OPTECH 3100

Six secteurs d'acquisition ont été définis et survolés à des dates différentes (figure 3.8). Les vols ont été réalisés avec un avion Pilatus Porter PC6.

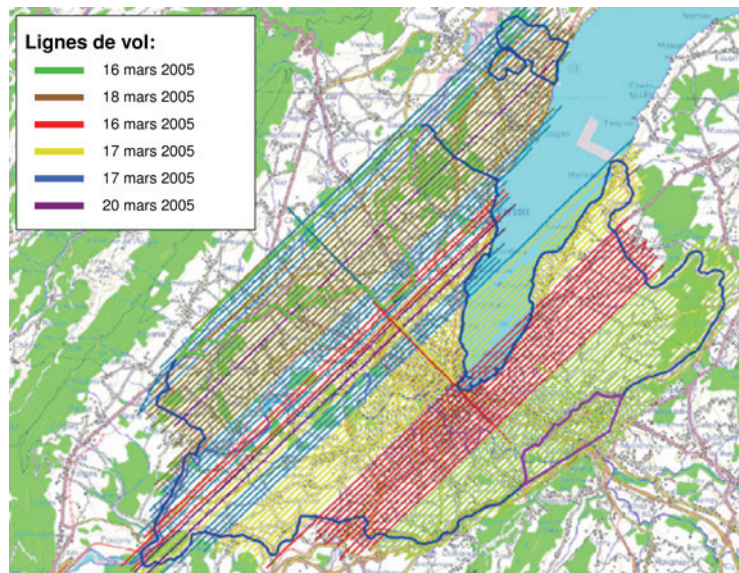


Figure 3.8. Découpage de la région d'acquisition en 6 secteurs. Au total, 79 lignes de vol d'une longueur de 1700 [m] ont été survolées. (© 2005, swissphoto (www.Swissphoto.ch)).

Les tableaux 3.6 et 3.7 résument respectivement les paramètres de mission ainsi que la précision des données résultantes..

Hauteur de vol	1000 [m]
Densité des points	supérieure à 1 [pt/m ²]
Fauchée	450 [m]
Empreinte au sol	~ 0.3 [m]

Tableau 3.6. Paramètres généraux pour les missions Optech ALTM 3100.

Précision planimétrique	30 à 40 [cm]
Précision altimétrique	15 [cm] (σ) pour les surfaces dures 25 [cm] (σ) pour les champs 40 [cm] (σ) pour les forêts

Tableau 3.7. Précision des données LiDAR issues du vol Optech ALTM 3100 sur le canton de Genève.

3.4.4. CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES TROIS SYSTÈMES

	Scan2map	ALTMS 2536	Optech 3100
Plate-forme	Hélicoptère	Avion	Avion
Mécanisme	miroir rotatif	miroir rotatif	miroir rotatif
Longueur d'onde	905 [nm]	1064 [nm]	1064 [nm]
Fréquence de balayage	6-80 [Hz]	43 [Hz]	47.3 [Hz]
Modèle d'IMU	LN-200 A1	Honeywell H-764G	POS AV 510 OEM
Fréquence d'impulsion	30 [kHz]	20 [kHz]	70 [kHz]
Divergence du faisceau	2.8 [mrad]	1.2 [mrad]	0.3 [mrad]
Angle de balayage	+/- 30 [°]	+/- 18 [°]	+/- 12.7 [°]
Nombre d'échos	premier écho, dernier écho ou mode alternatif (premier-dernier)	possibilité d'enregistrer jusqu'à 4 échos par impulsion	possibilité d'enregistrer jusqu'à 4 échos par impulsion
Classe de sécurité	classe 1	classe 4	classe 4
Portée max. du laser	450 [m] ^a	n.c.	3500 [m]

Tableau 3.8. Comparatif des trois systèmes utilisés dans cette étude

a. Surface plate, réflectivité de 80%.

3.5. SYNTHÈSE DU CHAPITRE

Ce chapitre définit le contexte dans lequel prennent place les développements méthodologiques qui composent le volet empirique de l'étude. Une description succincte de l'écosystème forestier permet d'appréhender les multiples fonctions attribuées aux forêts: fonctions économique, sociale, de protection et de conservation de la biodiversité. La présentation du cadre institutionnel et législatif existant en Suisse apporte ensuite quelques éclairages sur le contexte dans lequel s'insère le processus de gestion des forêts. Il est notamment intéressant de relever qu'il existe un certain nombre d'instruments à disposition des gestionnaires, comme le PG ou le PAF, afin de les guider dans leur travail. Sans être au coeur de la réflexion, ces compléments d'information permettent de poser le décor dans lequel s'intègre les différentes problématiques traitées.

La revue générale des sites d'étude met en évidence la diversité des milieux composant l'espace géographique de cette recherche. La nature et la composition des sites forestiers, la disponibilité des données altimétriques LiDAR, ainsi que l'existence des données de terrain de référence ont été des critères clés à prendre en compte pour valider le plus objectivement possible les méthodologies développées. Les données techniques relatives aux systèmes LiDAR exploités, ainsi que les paramètres plus spécifiquement liés aux missions de vol, sont finalement résumés à travers une série de tableaux. La connaissance de ces données est nécessaire pour la bonne interprétation des résultats issus des méthodologies développées dans les chapitres ultérieurs.

DÉTERMINATION DE CARACTÉRISTIQUES ÉLÉMENTAIRES À L'ÉCHELLE DE L'ARBRE

4.1. PROBLÉMATIQUE

4.1.1. INTRODUCTION

La mesure de la hauteur d'un arbre ou d'un couvert constitue une étape importante dans la gestion d'un peuplement. Elle permet au sylviculteur (Wouters & Lorent, 2000):

- de réaliser des calculs de volume,
- d'estimer la croissance et la production des arbres,
- de définir l'époque des éclaircies et des élagages,
- de calculer la portion du fût commercialement vendable,
- d'évaluer la stabilité des peuplements.

Cependant, elle peut s'avérer difficile à quantifier depuis le sol. En effet, l'identification univoque du pied et de la cime d'un arbre est parfois délicate en fonction de la structure verticale et de la densité du peuplement. Certaines régions de forêt de montagne sont encore très difficiles d'accès en raison d'une topographie très escarpée. Les appareils de mesure usuels pour estimer la hauteur d'un arbre sont basés soit sur des principes géométriques (croix du bûcheron, dendromètre de Frank), soit sur des principes trigonométriques (relascope de Bitterlich). La mesure de hauteur peut bien entendu être soumise à des erreurs dues à l'opérateur, à l'appareil de mesure ou encore aux conditions du terrain.

Ce chapitre étudie le potentiel des modèles altimétriques LiDAR pour l'extraction de caractéristiques de base à l'échelle de l'arbre. Plusieurs méthodes permettant, dans un premier temps, d'extraire automatiquement la localisation des arbres individuels et, dans un second temps, de leur attribuer une hauteur sont explorées. L'étude proposée prend en considération l'influence de la composition et de la structure du couvert forestier sur le résultats. Trois cas de figure sont traités successivement: les arbres isolés, les arbres en petits collectifs ainsi que les arbres en peuplement dense (structure verticale complexe). Il s'agit de présenter une alternative aux méthodes conventionnelles, afin d'extraire ces *caractéristiques élémentaires* ou *variables élémentaires*, et ainsi apporter une description brute et objective du couvert forestier

en place.

4.1.2. LOCALISATION DES SOMMETS

A partir d'une certaine densité de points de bruts LiDAR (environ 1 [pt/m²]), il devient possible d'identifier visuellement les sommets d'arbres individuels sur un profil. On peut ainsi concevoir qu'avec une méthodologie adaptée, il devient possible de localiser et compter les arbres avec pour unique source d'information un MNH. Deux remarques s'imposent toutefois. Premièrement, le mélange des essences en peuplement rend la distinction des couronnes plus ou moins aisée. Un peuplement pur de résineux, de par la forme conique des cimes, présente une structure très «rugueuse» qui facilite l'extraction des sommets. En revanche, la ligne plus arrondie des feuillus, ainsi que l'enchevêtrement entre les couronnes voisines, engendre une canopée bien plus uniforme («lisse»), ce qui complexifie l'extraction des arbres individuels. Deuxièmement, la densité et la complexité du couvert influencent le pourcentage d'arbres qu'il sera possible d'extraire. L'identification des arbres individuels est plus aisée lorsque ceux-ci se trouvent isolés et non en peuplement. Si la forme conique des résineux permet généralement une bonne identification des sommets, les feuillus posent plus de difficultés à cause de leurs couronnes plus larges et irrégulières. L'estimation de la position exacte du tronc par la simple vue d'en haut est alors plus complexe. Par ailleurs, l'irrégularité du sommet de la couronne ne permet pas toujours d'apprécier le nombre juste d'individus. Deux cas de figure peuvent se produire: soit on détecte deux sommets pour un seul individu, soit deux ou plusieurs arbres ont un tel enchevêtrement des couronnes que l'on sous-estime le nombre de tiges. De plus, alors que les arbres de la strate dominante sont généralement bien modélisés, les strates inférieures sont souvent masquées. Du moins, les sommets des arbres inférieurs seront mélangés aux couronnes des arbres voisins plus élevés.

Pour cette étude, la technique d'extraction des sommets repose principalement sur la méthode des maxima locaux. Cette dernière a déjà fait ses preuves dans de nombreuses études (Hyypä, 2000; St-Onge, 2000; Popescu et al., 2002; Kini & Popescu 2004; Pitkänen et al., 2004; Hirata et al., 2003). Il s'agit d'une technique relativement simple à implémenter et qui permet d'extraire les pixels d'une image d'entrée ayant les plus grandes valeurs (maxima locaux) à l'intérieur d'une fenêtre d'analyse mobile. Ce mode de filtrage offre une certaine liberté pour adapter les paramètres au type de couvert étudié. L'analyse porte sur le comptage des arbres isolés ou en collectifs dans un pâturage boisé, ainsi qu'une étude complémentaire dans un peuplement mature et fermé dominé par le chêne. L'acquisition de données précises sur le terrain a permis d'identifier les surdéterminations ainsi que les omissions. Le pourcentage d'arbres correctement détectés a finalement été calculé pour chaque secteur analysé.

4.1.3. DÉTERMINATION DES HAUTEURS INDIVIDUELLES

Les modèles altimétriques LiDAR, grâce au calcul d'un MNH, informent directement sur la hauteur de la canopée. Reste à savoir si cette information est robuste et en adéquation avec les précisions exigées pour la gestion forestière. Lorsque la position des sommets est connue, il est aisé de leur attribuer une hauteur sur la base du MNH raster. Par une fonction de recouvrement (*overlay*), les objets d'une couche vecteur se voient attribuer la valeur du pixel correspondant sur le MNH. Cependant, le processus d'interpolation suppose une certaine approximation de la cime des arbres. Cela se répercute sur la mesure de hauteur et se traduit généralement par une sous-estimation de la valeur réelle. Dans cette recherche, une méthodologie visant à minimiser les erreurs inhérentes au MNH raster a été évaluée. Elle repose sur une correction de la hauteur «raster» par une analyse du nuage initial de points bruts.

L'attribution des hauteurs complète logiquement la première phase permettant l'identification des individus. Sur la base de données de référence collectées sur le terrain, il a été possible d'estimer la précision absolue des hauteurs dérivées du LiDAR et ainsi juger du potentiel de cette technologie pour compléter ou remplacer les méthodes actuelles de mesure. L'estimation des hauteurs individuelles pour des arbres isolés, groupés en collectifs ou en peuplement, a été traitée séparément afin de juger de l'influence de la proximité des couronnes sur le résultat.

Afin de valoriser l'estimation des hauteurs individuelles des essences par LiDAR, la possibilité d'extraire automatiquement les arbres remarquables par leur taille a également été évaluée. La connaissance de la position des plus grands individus d'un peuplement est aussi une information très utile pour le gestionnaire de la forêt, car ils représentent des niches potentielles pour certaines espèces d'oiseau ou ils servent encore de points de repères cruciaux sur le terrain. Deux méthodologies ont été évaluées pour l'extraction automatique de cette information.

4.2. ETAT DE L'ART DANS LE DOMAINE DU LiDAR

4.2.1. ETUDES RELATIVES À LA LOCALISATION DES SOMMETS

La méthode des maxima locaux est une technique courante utilisée pour l'identification des sommets des arbres sur les images aériennes à haute résolution (Wulder et al. 2000a). Cette technique fonctionne avec les images optiques car, en général, la réflectance d'une couronne est maximale à son apex. Cette propriété se retrouve également sur le MNH LiDAR. Sur la totalité des points de mesures laser tombant sur une couronne, les plus hautes valeurs de hauteur se trouvent à l'apex. La méthode des maxima locaux s'applique donc bien aux images LiDAR. En plus de l'utilisation de tailles de fenêtre de convolution fixes, plusieurs études originales proposent des méthodologies optimisées en fonction de certaines caractéristiques de la canopée.

Persson et al. (2002) ont utilisé la méthode des maxima locaux pour l'étude d'une forêt située au sud de la Suède. Cette dernière était essentiellement composée de bouleaux et de conifères (pins sylvestres et épicéas) d'âge moyen à plus âgé. 71% des arbres ayant un diamètre à hauteur de poitrine (dhp) supérieur à 5 [cm] ont été correctement identifiés. Pour cette étude, le MNH a été préalablement traité par une combinaison de filtres gaussiens.

Popescu et al. (2002) ont implémenté une méthode qui adapte localement la taille de la fenêtre de convolution pour la détection des sommets par la méthode des maxima locaux. Selon la hauteur du pixel analysé, le voisinage défini pour la recherche du maximum sera plus ou moins étendu. Plus concrètement, un diamètre de couronne théorique est calculé pour chaque pixel. Sur la base de ce calcul, une taille de fenêtre d'analyse est sélectionnée parmi trois possibilités. La relation entre le diamètre de couronne et la hauteur de l'arbre a été définie par une régression linéaire.

Pitkänen et al. (2004) proposent une étude relativement complète qui reprend en partie les éléments développés dans les deux précédents articles (à savoir Persson et al., 2002; Popescu et al., 2002). Ils exposent ainsi trois méthodes distinctes pour la délimitation des arbres individuels. Les secteurs d'étude étaient essentiellement composés de forêts matures, denses et souvent étagées avec pour essences dominantes l'épicéa, le pin et le bouleau. La première méthode consiste à adapter le degré de lissage du MNH, c'est-à-dire la valeur s du filtre gaussien, en fonction de la hauteur du pixel. La méthode des maxima locaux est ensuite appliquée au modèle filtré pour identifier la position des sommets. Les deux autres méthodes utilisent un modèle du diamètre des couronnes, déduit de la hauteur de l'arbre par régression, pour affiner le mode de détection des sommets. Pour l'ensemble des méthodes, les résultats n'ont pas été très bons. Seulement environ 40% de l'ensemble des arbres, mais 60-70% des arbres dominants, ont été correctement détectés. Le filtrage gaussien remplit bien son rôle puisqu'il permet de limiter le nombre de surdéterminations (false positives) à moins de 10%, au lieu des 65% obtenus sur un MNH brut.

Une approche originale, implémentée par Kini & Popescu (2004), permet d'adapter le choix de la fenêtre de convolution au type d'essence (feuillu ou conifère). Il faut disposer pour cela d'une classification préalable de la zone d'étude afin de pouvoir identifier si un pixel donné du MNH appartient à une couronne de conifère ou de feuillu. Cette classification est réalisée à partir d'une orthoimage proche infrarouge. Une équation pour chaque type d'essence est ensuite utilisée pour calculer la taille optimale de la fenêtre d'analyse.

Plutôt que de passer par une détection directe des sommets par la méthode des maxima locaux, une autre approche consiste à identifier les arbres individuels par la délimitation des houppiers. Une première mé-

thode fréquemment utilisée consiste à suivre les vallées d'intensité de l'image (Gougeon, 1995a) et à détecter la frontière de la couronne avec des méthodes de détection de bordures (Brandtberg et al., 2003; Leckie et al., 2003). Une seconde stratégie possible consiste à réaliser une segmentation du MNH par un algorithme de croissance de région (St-Onge & Vepakomma, 2004; Suárez et al., 2005). Ce dernier à la propriété de regrouper dans des primitives objets les pixels ayant des caractéristiques de réflectance et de hauteur similaires.

Alors que l'ensemble des méthodologies décrites précédemment reposent sur l'analyse du MNH au format raster, Tiede et al. (2005) ont développé un algorithme de détection des sommets par les maxima locaux reposant sur l'analyse du nuage de points bruts. En prenant le MNT raster comme référence, une valeur de hauteur a été calculée pour chaque point brut. L'identification des sommets repose ensuite sur l'analyse locale du voisinage de chaque point brut à l'aide d'une fenêtre d'analyse de taille variable. L'expérience a été conduite sur six secteurs de la forêt bavaroise au sud est de l'Allemagne, composés de peuplements mixtes. La proportion de la totalité des arbres correctement détectés n'est que de 51% sur l'ensemble des sites, alors que 72.2% des arbres dominants ont été judicieusement identifiés. La proportion de surdétermination est également faible puisqu'elle reste inférieure en moyenne à 3%.

En complément, il est intéressant mentionner les travaux de Pyysalo & Hyypä (2002) qui ont mené une recherche visant à reconstruire un modèle vectoriel des couronnes des arbres par l'analyse du nuage de points bruts. De ce modèle a pu être estimée la localisation du tronc. Une analyse de la précision réalisée sur 50 arbres a pu montrer une erreur standard de 0.87 [m] en coordonnées x et 0.79 [m] en coordonnées y.

4.2.2. ETUDES RELATIVES À L'ESTIMATION DE LA HAUTEUR DES SOMMETS

De premières études, réalisées dès les années 90, montrèrent très vite le grand potentiel des données altimétriques LiDAR pour l'estimation des hauteurs de peuplements ou des arbres individuels qui les composent. La précision des hauteurs obtenues dépend des caractéristiques du système utilisé, des paramètres du vol, mais aussi de densité et de la structure du peuplement étudié (Lovell et al. 2003).

Les méthodes utilisées pour estimer les hauteurs individuelles des arbres passent généralement par le calcul d'un MNH raster. Plusieurs options sont ensuite possibles:

- La méthode des maxima locaux permet d'extraire la position des sommets, à qui on attribue une hauteur dans un second temps (Hyypä & Inkinen 1999, St-Onge 1999, Pitkänen 2001, Persson et al. 2002, Holmgren et al. 2003).
- Une segmentation du MNH, par un algorithme de croissance de région par exemple, permet d'extraire les couronnes des houppiers. La hauteur de l'arbre est ensuite déduite sur la base d'une analyse des hauteurs (des pixels ou des points bruts) à l'intérieur de chaque segment (St-Onge 1999, Suarez et al. 2004).
- Un filtrage adapté du MNH (par une combinaison de filtres gaussien et laplacien) permet encore d'identifier les couronnes, puis d'attribuer une hauteur dans un seconde étape (St-Onge et al. 2000, Lim et al. 2001).

Dès les premières études, il a été très vite démontré que les hauteurs estimées par le biais des modèles LiDAR sont aussi précises, voir plus précises que les méthodes traditionnelles d'inventaire. Afin d'illustrer ces propos, les résultats issus de trois différentes études sont résumés dans le tableau 4.1:

	St-Onge, 1999	Lim et al., 2001	Suarez et al., 2005
Type de forêt étudiée	Forêt boréale (Canada)	Forêt de feuillus (Canada)	Forêt d'épicéas (Ecosse)
Système LiDAR	Optech ALTM 1020 Densité: ~1 [pt/m ²]	ALTM 1225	Optech 2033
Taille de l'échantillon des données de terrain	36 arbres	146 arbres	354 arbres
Modèle de régression ^a	$H_T = 4.24 + 0.91 * H_L$ $R^2 = 0.90$	$H_T = 0.005 + 1.004 * H_L$ $R^2 = 0.92$	$H_L = 0.9272 * H_T$ $R^2 = 0.89$
Précision des hauteurs estimées (Différence moyenne entre les hauteurs LiDAR et les hauteurs terrain)	1.4 [m] ($\sigma = 1.15$ [m])	34 arbres sous-estimés: - 27 de moins d'1 [m] - 7 entre 1 et 3 [m] 111 arbres surestimés: - 64 de moins d'1 [m] - 47 entre 1 et 7 [m]	73% de l'ensemble des arbres à moins d'1 [m] 91% de l'ensemble des arbres à moins d'1.5 [m] 96% de l'ensemble des arbres à moins de 2 [m]

Tableau 4.1. Comparaison de 3 différentes études traitant de l'estimation des hauteurs individuelles des arbres.

a. H_T =Hauteur mesurée sur le terrain; H_L =Hauteur LiDAR.

4.3. SITES ET SOURCES DE DONNÉES

Afin de pouvoir évaluer la méthode des maxima locaux sur différentes structures et compositions forestières, deux sites d'étude ont été sélectionnés sur le 3ème arrondissement du canton de Neuchâtel: La Fruitière de Bevaix (division 40 de la forêt communale de Bevaix) ainsi qu'un secteur d'un hectare sur la division 55 de la commune de Boudry.

L'estimation des hauteurs repose sur l'analyse de deux sites sélectionnés sur le 3ème arrondissement du canton de Neuchâtel. Le premier site est le pâturage boisé de La Fruitière de Bevaix. Il a permis d'analyser les hauteurs individuelles pour les arbres isolés ou en collectifs. Ses principales caractéristiques ont été exposées précédemment. Le second site concerne la division 8 de la forêt communale de Bevaix. Il a fait l'objet de mesures spécifiques sur le terrain, afin d'acquérir des données de référence pour l'analyse des hauteurs individuelles des arbres en peuplement, ainsi que pour l'identification des arbres remarquables.

4.3.1. LA FRUITIÈRE DE BEVAIX

Le site de La Fruitière de Bevaix a l'avantage de disposer d'un inventaire précis et complet réalisé lors d'une campagne de terrain conduite en mai 2007 (annexe A). Il s'agit d'un secteur de pâturage boisé composé de 91 arbres (30 feuillus et 61 conifères). Le choix d'un secteur de pâturage boisé se justifie par le fait qu'il était impératif de disposer d'assez de recul et de visibilité pour s'assurer d'une bonne identification des pieds et des cimes des arbres mesurés. Le positionnement précis de la station totale par DGPS nécessite également des conditions d'ouverture non réalisables en peuplement. Pour l'ensemble des arbres composant ce secteur, on dispose notamment d'une mesure de la position du tronc, de la hauteur de l'arbre ainsi que du type d'essence:

Variable	Technique de levé	Précision (écart-type)
Position du tronc (P_{xy})	mesure au tachéomètre avec réflecteur	20 [cm] ^a
Hauteur de l'arbre (H_a)	mesure d'angle au tachéomètre	1 [m]
Hauteur de couronne (H_c)	mesure d'angle au tachéomètre	1 [m]
Diamètre du tronc ^b (DHP)	chevillère	5 [cm]
Diamètre de la couronne (D_c)	chevillère (2 mesures perpendiculaires)	1 [m]
Essence	observation directe	distinction entre feuillu-conifère

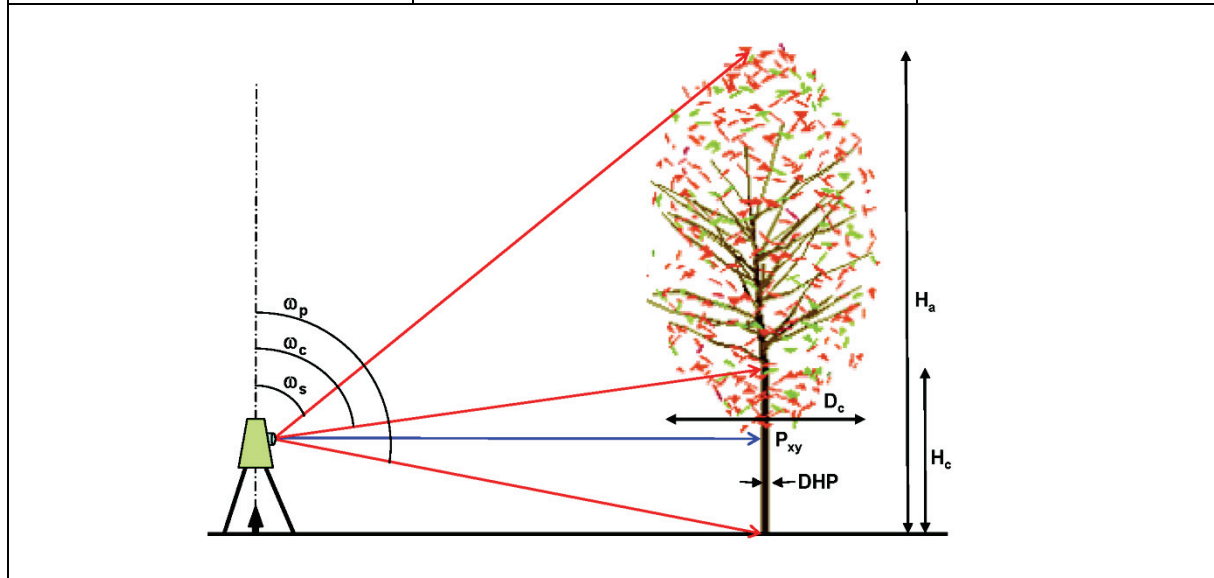


Tableau 4.2. Variables mesurées lors de la campagne de terrain sur le site de La Fruitière de Bevaix.

- Cette valeur prend en compte la mesure de la distance, et le placement du réflecteur.
- Le diamètre à hauteur de poitrine est mesuré à une hauteur sol de 1.30 [m].

Lors de cette campagne, une seule mesure de hauteur a été réalisée pour chaque arbre. Le fait de disposer de deux mesures perpendiculaires (St-Onge, 2000) aurait permis d'évaluer la précision des hauteurs et, le cas échéant, éliminer les valeurs aberrantes. Quoi qu'il en soit, la qualité de l'instrumentation nous permet d'estimer une précision de mesure inférieure ou égale au mètre.

La distribution des diamètres à hauteur de poitrine (dhp), de forme gaussienne, est illustrée par la figure 4.1. La structure verticale du pâturage est donc relativement homogène avec une moyenne des hauteurs de 20.8 [m] et un écart-type de 5.8 [m]. La plus petite hauteur mesurée est de 6.9 [m] et la hauteur maximale atteint 30.6 [m].

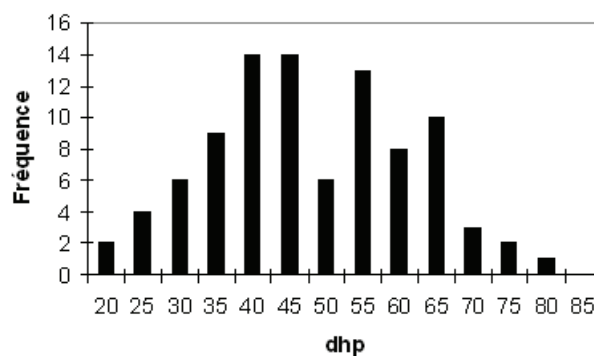


Figure 4.1. Histogramme de distribution des dhp pour le site de La Fruitière de Bevaix.

4.3.2. PEUPLEMENT SUR LA DIVISION 55 DE LA COMMUNE DE BOUDRY

Le secteur d'un hectare sur la division 55 de la commune de Boudry a fait l'objet d'un inventaire de terrain complet dans le cadre d'un cours sur la gestion durable des forêts à rôle de protection. Les données nous ont été fournies par l'ingénieur forestier du 3^{ème} arrondissement du canton de Neuchâtel. L'essence et le diamètre à hauteur de poitrine ont été relevés pour les 156 arbres composant la parcelle. Le couvert est composé pour 83% de feuillus (dont 70% sont des hêtres) et 17% de conifères (sapins et épicéas) (figure 4.2).

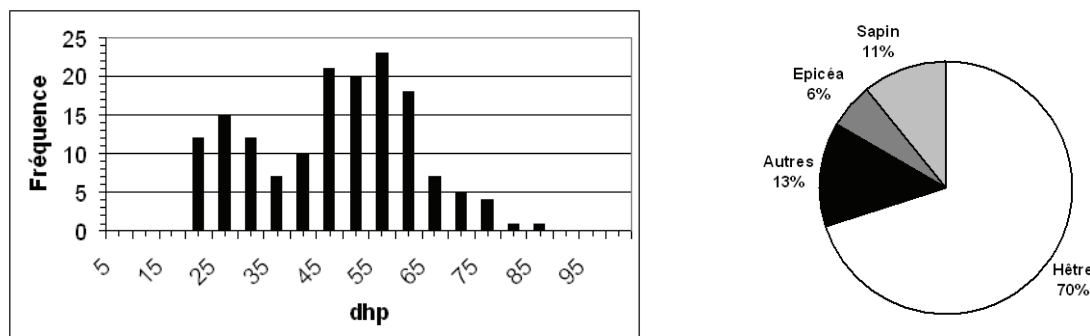


Figure 4.2. A gauche: un histogramme de distribution des diamètres à hauteur de poitrine (dhp) sur le secteur d'un hectare appartenant à la division 55 de la commune de Boudry. A droite, un diagramme de distribution des essences.

La position des sommets pour la totalité des arbres inventoriés a été relevée et validée sur le terrain, en prenant comme référence une cartographie papier avec l'ombrage du MNH. Les positions ont ensuite été digitalisées (précision planimétrique estimée: 1 [m]). Les diamètres à hauteur de poitrine ont été mesurés à l'aide d'un compas de forestier (précision estimée: 5 [cm]). Ce secteur est un complément essentiel pour évaluer la méthode des maxima locaux sur un peuplement fermé et complexe (mélange de différents âges).

4.3.3. DIVISION 8 DE LA FORÊT COMMUNALE DE BEVAIX

La division 8 de la forêt communale de Bevaix est une unité d'aménagement d'une surface de 9 [ha] constituée d'une mosaïque de douze peuplements. Le hêtre représente 34% du volume ligneux. Il est suivi de l'épicéa (30%), du sapin blanc (29%), du chêne sessile (6%) et de dix autres espèces inventoriées. Ces données résultent de l'inventaire intégral, situation au 1^{er} janvier 1998. Une série de coupes de grands arbres, des conifères pour la grande majorité, a été réalisée sur cette division quelques mois après le vol LiDAR Scan2map, soit le 24 octobre 2005. Avant d'être débordés, ces arbres ont été mesurés sur le terrain à l'aide d'une chevillère (figure 4.3).



Figure 4.3. Mesure de la longueur effective des grands arbres sur le parterre de coupe (exemple d'un épicéa de 36 [m]). Photographie: Pascal Junod.

Pour faciliter le débardage, les troncs ont été découpés en plusieurs tronçons. Il a cependant été possible de mesurer 20 arbres dans leur totalité (de la souche à la cime). Dans ces conditions, on peut raisonnablement estimer que la précision des mesures est inférieure ou égale à 1.5 [m]. En complément, l'essence et le diamètre à hauteur de poitrine ont été notés pour chaque arbre. La moyenne des hauteurs pour les 20 arbres est de 31.3 [m] avec un écart-type de 2.6 [m]. La plus petite hauteur mesurée est de 27.5 [m] et la hauteur maximale atteint 36.9 [m]. L'échantillon compte 9 épicéas, 9 sapins blancs et 2 hêtres.

4.3.4. DONNÉES LiDAR ET ORTHOPHOTOS

Le tableau 4.3 résume les données à disposition ainsi que les dates d'acquisition pour les trois sites traités.

Site	Campagne de terrain	Données LiDAR ^a		Données photographiques (orthophotos RGB)		
	Date	Système	Date du vol	Caméra	Date du vol	Résolution spatiale
La Fruitière de Bevaix	04/2007	Scan2map	06/2005	Hasselblad H1	06/2005	10 [cm]
Division 8 (Bevaix)	02/2006	ALTMS	01&02/2001 & 10/2002	DMC Zeiss Intergraph	06/2006	25 [cm]
Division 55 (Boudry)	06/2007	ALTMS	01&02/2001 & 10/2002	DMC Zeiss Intergraph	06/2006	25 [cm]

Tableau 4.3. Tableau résumé des données utilisées pour l'étude consacrée à la détermination de la hauteur des sommets.

- a. Les données techniques spécifiques aux systèmes LiDAR, ainsi que les paramètres des missions de vol, sont exposés au chapitre 3 «Source et nature des données LiDAR».

4.4. MÉTHODE POUR LA DÉTECTION DES SOMMETS

La méthodologie globale pour la détection des sommets à partir de modèles altimétriques LiDAR peut se résumer à deux étapes:

- La création d'un modèle numérique de hauteur.
- L'identification des maxima locaux.

4.4.1. CRÉATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE DE HAUTEUR

L'algorithme des maxima locaux nécessite de travailler sur une image numérique. La première étape consiste donc à calculer un MNT et un MNS au format raster. Le MNH, qui s'obtient ensuite par la soustraction du MNT au MNS, constitue le modèle de base pour la suite des traitements (figure 4.4). Il permet de faire abstraction du relief et chaque objet du modèle est alors représenté par sa hauteur relative au terrain.

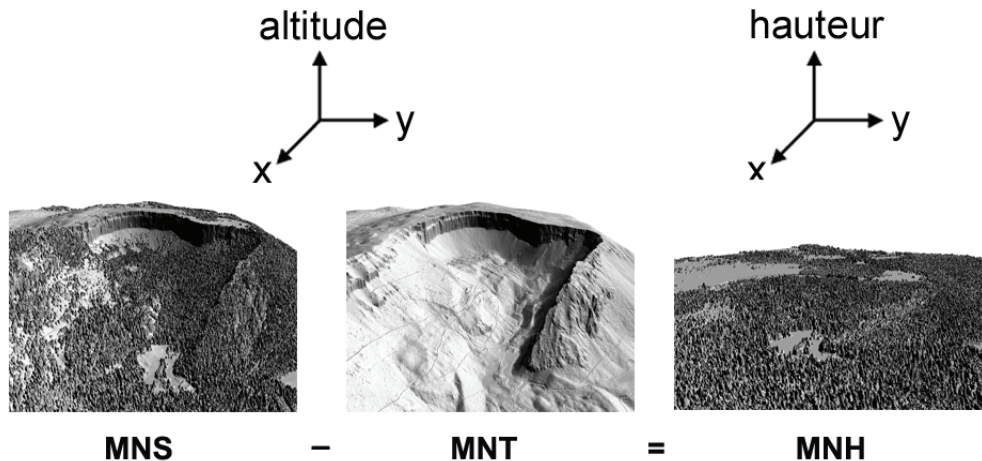


Figure 4.4. Calcul du MNH avec pour exemple la région du Creux du Van (NE).

Sources de données: MNS-MNT-MO; © 2001 Données de la mensuration officielle (www.swisstopo.ch).

La qualité du MNH va donc dépendre de la qualité (calibrage des données, méthode de classification sol/sursol) des deux modèles dont il est issu: le MNT et le MNS. Une canopée trop dense peut avoir pour conséquence une densité de points bruts au sol faible à insuffisante. Les conséquences sont une approximation de la topographie du terrain qui va se répercuter sur le calcul de la hauteur. Les erreurs seront d'autant plus importantes que le terrain est escarpé.

Le choix de la méthode d'interpolation va également influencer certaines propriétés des modèles. Gonçalves (2006) propose une étude comparative de six algorithmes: voisinage naturel, pondération inverse à la distance, TIN, spline, krigeage, fonctions radiales de base. Les résultats montrent cependant, qu'avec une densité élevée de mesures LiDAR, les différences entre les différentes interpolations sont faibles et la corrélation entre les modèles élevée. Pour cette étude, les interpolations TIN (*Triangular Irregular Network*) et IDW (*Inverse Distance Weighting*) ont été évaluées en parallèle. Ce choix se justifie par leur implémentation dans un grand nombre de logiciels SIG et par le fait qu'elles constituent des standards en matière de généralisation de modèles numériques d'altitude.

Ajoutons que la très haute résolution peut engendrer un bruit dans le modèle. Cela perturbe l'utilisation de certains algorithmes exploitant des propriétés très locales. Les effets de l'application d'un filtre passe-bas pour limiter ce problème ont été évalués.

INTERPOLATION PAR LA MÉTHODE TIN

La triangulation irrégulière implique que tous les points bruts originaux soient connectés par un réseau de triangles irréguliers, aussi équilatéraux que possible. C'est la règle de Delaunay qui fixe que chaque triangle formé définit un cercle circonscrit qui ne contient aucun autre sommet de triangle. Le recours à des triangles assure que la surface "mosaïque" ainsi créée sera la mieux ajustée possible, chaque triangle ayant pour but d'être le meilleur ajustement local possible. L'interpolation TIN permet également de

transformer un modèle TIN vecteur en modèle TIN raster. La rasterisation consiste à plaquer une grille régulière sur le modèle TIN et à calculer pour chaque pixel une altitude. Une valeur est calculée pour chaque cellule sur la base d'une combinaison de variables: la valeur originale des points, la pente des faces TIN individuelles et adjacentes, la distance aux triangles voisins. Les cassures entre les faces du modèle restent donc présentes même si après le changement de format certaines auront été lissées.

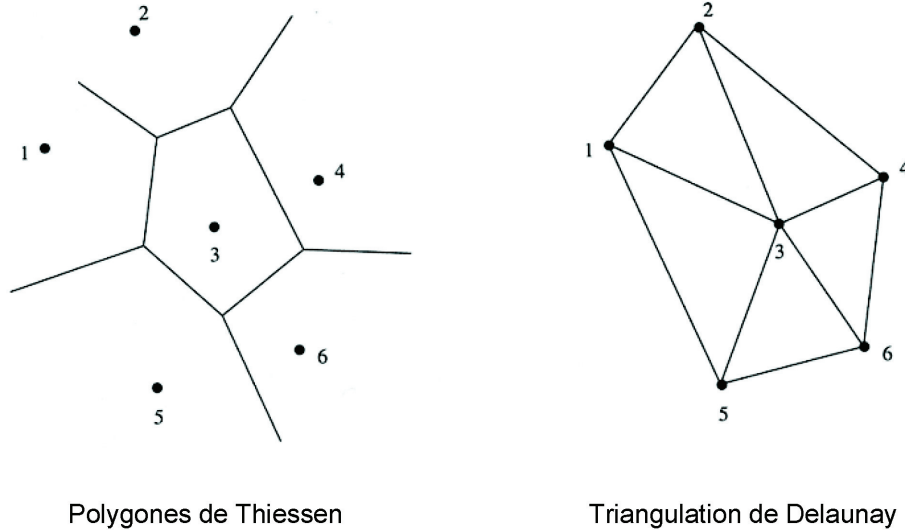


Figure 4.5. Polygones de Thiessen et triangulation de Delaunay.

INTERPOLATION PAR LA MÉTHODE IDW

L'interpolation par la méthode de pondération inverse à la distance calcule une valeur pour chaque nœud de la grille par analyse des points avoisinants définis par un rayon de recherche. Elle consiste à attribuer à chaque point brut s_i retenu dans la sélection un poids inversement proportionnel à la distance entre ce point brut et le nœud de la grille à estimer s_0 . L'allure des surfaces issues de cette méthode est très adoucie. Le nombre de points intervenant dans l'estimation est fonction de la densité des données de départ. Si la densité des données est faible et que l'on choisit un grand rayon de recherche, des points trop éloignés du site à estimer seront pris en compte et l'altitude interpolée ne sera pas forcément conforme à la réalité. Si la densité des données de départ est forte, rien ne sert de réaliser l'estimation sur beaucoup de points puisque cela augmenterait le temps de calcul et le résultat ne serait pas meilleur. L'estimation de la valeur calculée pour un nœud de la grille peut s'exprimer par la formule suivante:

$$\hat{Z}(S_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z(S_i)}{|S_i - S_0|^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{|S_i - S_0|^p}} \text{ avec } p > 0 \quad (4.1)$$

S_i : point brut retenu pour le calcul

S_0 : point à estimer (nœud de la grille)

p : exposant (avec $p > 0$)

n : nombre de points bruts pris en compte pour le calcul

$Z(S_i)$: moyenne arithmétique des valeurs retenues

$\hat{Z}(S_i)$: estimateur

Figure 4.6. Equation de l'interpolation IDW.

En faisant varier l'exposant p dans la formule ci-dessus, on obtient une grande gamme de valeurs pour le système de pondération. Quand p tend vers 0, les poids deviennent égaux et l'estimation converge vers

la moyenne arithmétique des valeurs $z(S_i)$ d'altitudes retenues pour l'estimation. Quand p tend vers l'infini, l'influence des points proches est très largement supérieure à celle des points plus éloignés. Les valeurs généralement employées pour ce paramètre sont 1 et 2.

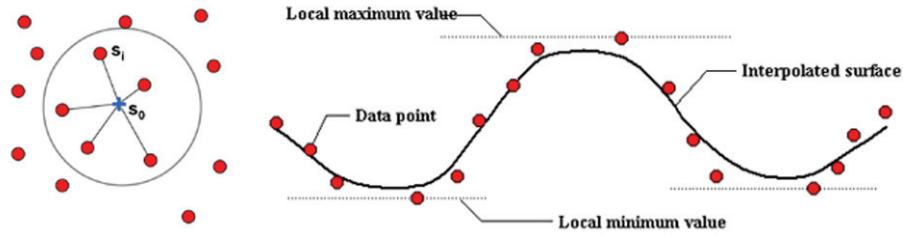


Figure 4.7. Pondération inverse à la distance (à gauche): seuls les points bruts s_i se trouvant à l'intérieur du rayon de recherche participent au calcul qui attribuent une valeur d'altitude au noeud de la grille s_0 . Schéma d'un profil d'interpolation (à droite).

Cette méthode d'interpolation est indifférente à la configuration géométrique des points à partir desquels elle va estimer les noeuds de la grille raster (seule la distance compte). Elle a, par conséquent, tendance à donner beaucoup d'importance à l'altitude de points situés dans une même zone alors que cette information d'altitude est redondante (Arnaud & Emery, 2000).

Les paramètres d'interpolation utilisés pour cette étude sont (logiciel MapInfo 6.5):

- Résolution de la grille résultante: 1[m].
- Rayon de recherche maximal (voisinage): 6 [m].
- Exposant: 3.
- Nombre de point minimum: 1.
- Nombre de points maximum: 3.

FILTRAGE DU MNH

En utilisant la méthode des maxima locaux, les couronnes larges et pommelées des feuillus sont souvent responsables de surdétermination de sommets. Un moyen d'atténuer ce phénomène consiste à appliquer un filtre gaussien au MNH. De cette manière, on enlève un certain niveau de bruit, tout en conservant au maximum la morphologie générale de la canopée. Le filtre choisi pour cette étude est décrit par une fenêtre de 5 par 5 pixels normalisés. En traitement d'image, on analyse des données à deux dimensions (x, y) . On introduit donc une fonction gaussienne à deux dimensions $G(x, y)$:

$$G(x, y) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \delta^2} \cdot e^{-\frac{(x^2 + y^2)}{2 \cdot \delta^2}} \quad (4.2)$$

Le paramètre d (la déviation standard) détermine la forme de la gaussienne. Etant donné que les images numériques sont composées de valeurs discrètes, le noyau gaussien sera composé aussi de valeurs discrètes.

Noyau gaussien 5*5

4	7	8	7	4
7	12	14	12	7
8	14	16	14	8
7	12	14	12	7
4	7	8	7	4

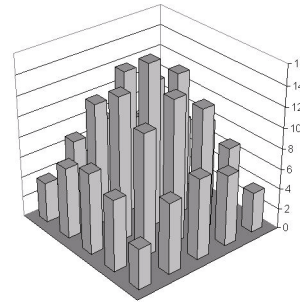


Figure 4.8. Fenêtre d'analyse du filtre gaussien.

Le filtre gaussien a été préféré à un filtre moyen. La pondération de la moyenne, qui consiste à accorder un poids plus important aux pixels proches du centre de la fenêtre d'analyse, donne en effet un meilleur lissage et une réduction de bruit plus satisfaisante.

4.4.2. IDENTIFICATION DES MAXIMA LOCAUX

Le principe de détection des sommets par les maxima locaux consiste à faire passer une fenêtre glissante, d'une taille définie, sur le MNH. Ligne par ligne, la totalité des pixels de l'image sont analysés. Un pixel est marqué comme sommet lorsque sa valeur est supérieure aux valeurs des pixels voisins dans la fenêtre d'analyse. Comme résultat, une grille binaire est générée avec des «1» aux positions des sommets et «0» partout ailleurs (figure 4.9). Afin de comparer de manière optimale la position des sommets avec les données de références collectées sur le terrain, les sommets ayant une hauteur inférieure à 2 [m] sont éliminés. De cette manière, les irrégularités proche du sol sont filtrées et seuls les arbres au-delà d'un certain diamètre sont pris en considération. L'élimination des sommets inférieurs à 2 [m] est réalisée durant le processus d'identification des sommets où tous les pixels inférieurs à 2 [m] se voient automatiquement attribuer une valeur de «0». La grille binaire résultante du calcul est ensuite reclassifiée pour éliminer les valeurs nulles. Une conversion de format permet finalement de modéliser les pixels des sommets en points vecteurs.

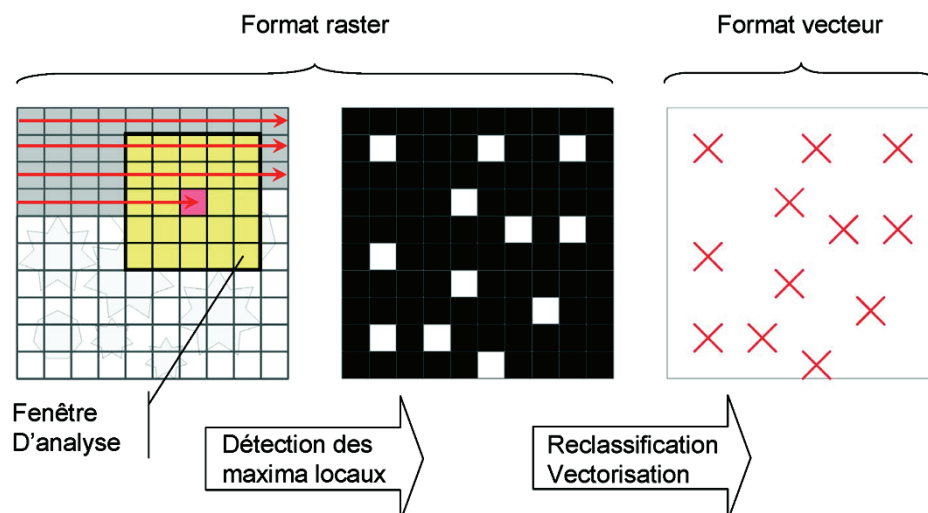


Figure 4.9. Processus complet de la détection des sommets par la méthode des maxima locaux. A gauche, schéma illustrant le balayage ligne par ligne effectué par la fenêtre mobile. Au centre, la grille binaire résultante. Les carrés blancs identifient les pixels attribués à des sommets. A droite, les croix localisent la position des sommets en mode vecteur.

TAILLE ET FORME DE LA FENÊTRE D'ANALYSE

Le choix d'une fenêtre appropriée est crucial pour une identification satisfaisante des sommets par la méthode des maxima locaux. Tout d'abord, la taille doit être adaptée à la problématique. Dans le contexte forestier, une taille de fenêtre qui s'approche le plus possible de la taille d'une couronne d'arbre semble se justifier. Afin d'analyser la sensibilité de ce paramètre, trois différentes tailles fixes de fenêtre ont été évaluées: 3×3 [m²], 5×5 [m²], 7×7 [m²]. Une fenêtre trop petite aura pour conséquence la détection d'un nombre de maxima plus important que le nombre de sommets réels. On parle dans ce cas d'erreur de *surdétermination*. A l'inverse, une trop grande fenêtre d'analyse sera trop sélective et masquera la détection de maxima. On parle alors d'erreur d'*omission*. Les structures forestières sont souvent complexes. Le mélange d'essence et des âges implique que des diamètres très hétérogènes de couronnes se côtoient. Pour cette raison, une approche complémentaire visant à adapter la taille de la fenêtre d'analyse selon la hauteur du couvert (estimée par la valeur du pixel central) a été testée. En partant de l'hypothèse que plus un arbre est grand, plus sa couronne est large, trois seuils ont été fixés de manière empirique (avec les conseils et l'expérience d'un ingénieur forestier du canton de Neuchâtel):

- Hauteur du pixel inférieure à 20 m: fenêtre d'analyse 3×3 [m²]
- Hauteur du pixel comprise entre 20 et 30 m: fenêtre d'analyse 5×5 [m²]
- Hauteur du pixel supérieure à 30 m: fenêtre d'analyse 7×7 [m²]

Finalement, la forme de la fenêtre est encore un paramètre sur lequel on peut agir (Kini & Popescu 2004). Même si en milieu naturel on est amené à rencontrer des géométries de couronne variables, façonnées notamment par la concurrence entre les essences, la forme circulaire semble être le meilleur compromis. Les trois fenêtres d'analyse qui entrent finalement en jeu dans la méthodologie de détection des sommets sont illustrées dans la figure 4.10.

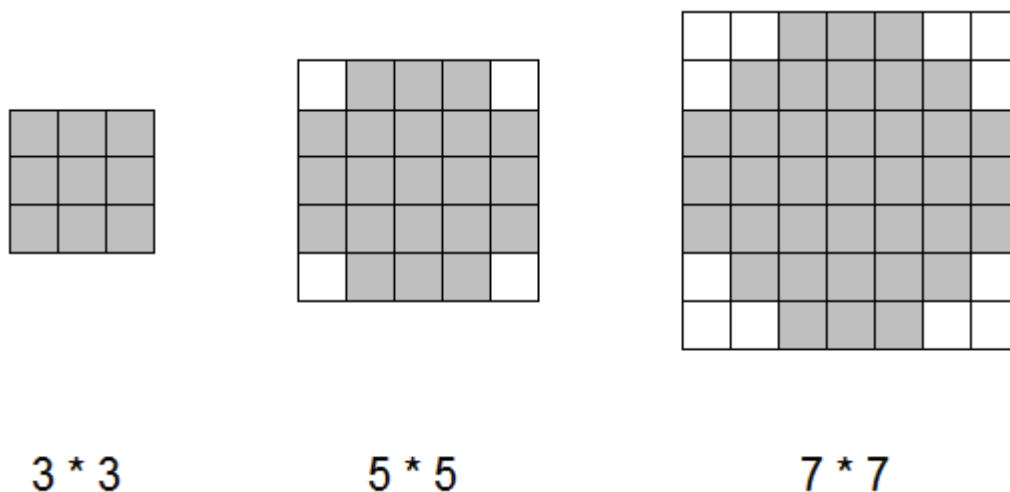


Figure 4.10. Fenêtres d'analyse utilisées pour la détection des sommets avec le MNH d'une résolution spatiale de 1 [m]. Pour les MNH ayant une résolution spatiale de 0.5 [m], des fenêtres de 6×6 , 10×10 et 14×14 pixels ont été utilisées pour préserver la même échelle d'analyse.

La méthodologie générale pour la détection des sommets est résumée dans la figure 4.11:

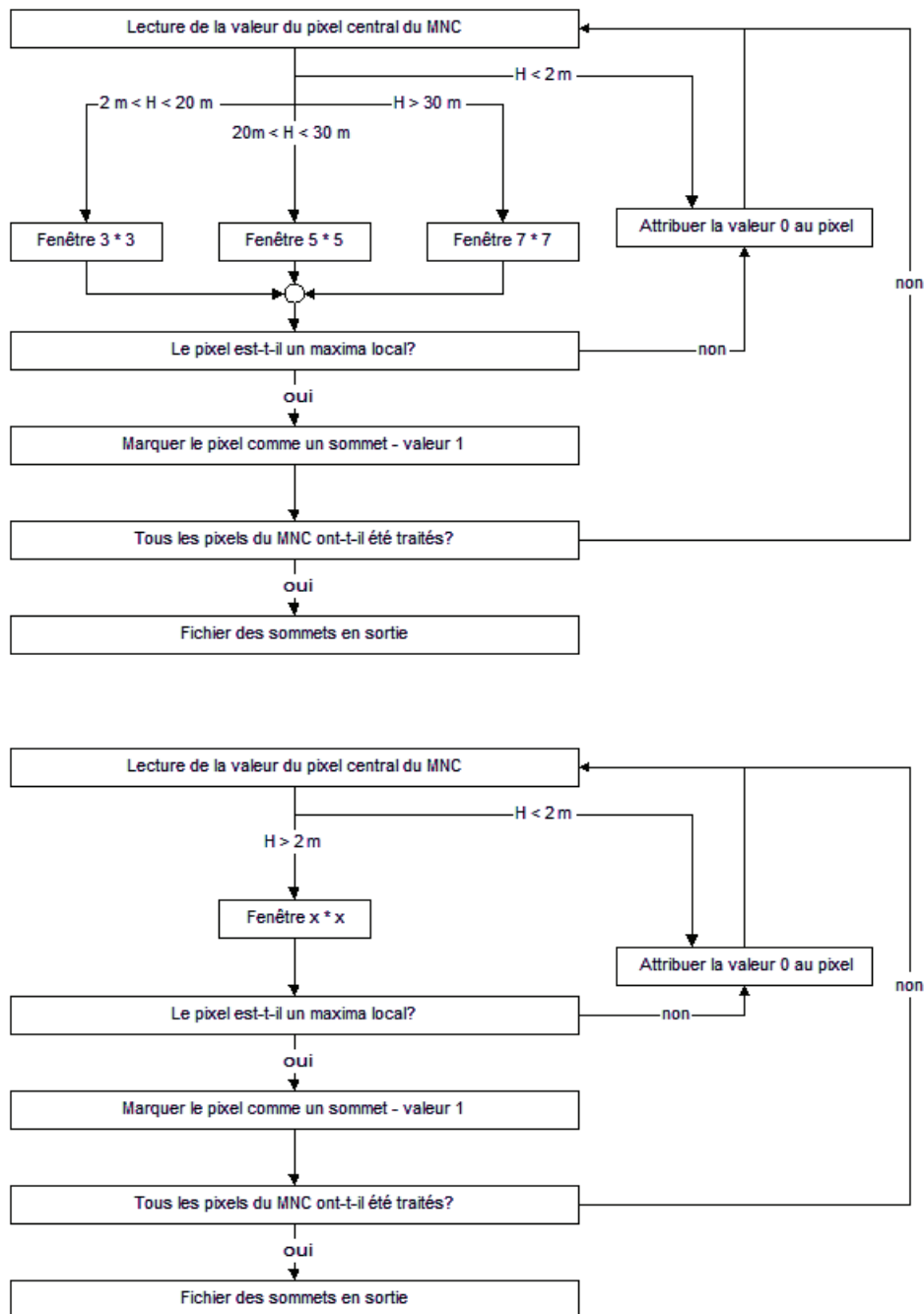


Figure 4.11. En haut, le schéma méthodologique pour la détection des sommets avec fenêtre de taille variable; en bas, la même représentation pour une fenêtre de taille fixe (x [pixels]).

4.4.3. APPLICATION SUR LE SITE DE LA FRUITIÈRE DE BEVAIX

L'influence de trois paramètres pour la détection des sommets a été évaluée:

- La méthode d'interpolation: TIN et IDW.
- La taille de la fenêtre d'analyse: 3×3 [m^2], 5×5 [m^2], 7×7 [m^2], ainsi que l'approche par fenêtre à taille variable.
- L'effet d'un filtre gaussien 5×5 sur le MNH.

Afin de faire une distinction entre la détection d'arbres isolés ou en collectif, deux groupes distincts ont été sélectionnés:

- 19 arbres isolés ou en lisière.
- 20 arbres en collectifs.

Le critère pour qu'un arbre soit noté comme correctement identifié est double:

- un sommet doit être détecté dans un voisinage de 3 [m] autour de l'arbre,
- la hauteur du sommet détecté doit être supérieure à la moitié de la hauteur de l'arbre mesurée sur le terrain.

Un arbre n'ayant pas été détecté dans un rayon de 3 [m] compte pour une omission. A l'inverse, les sommets détectés hors du rayon de 3 [m] d'un arbre de référence génèrent des surdéterminations. Plusieurs sommets détectés dans un même voisinage de 3 [m] génèrent également des surdéterminations.

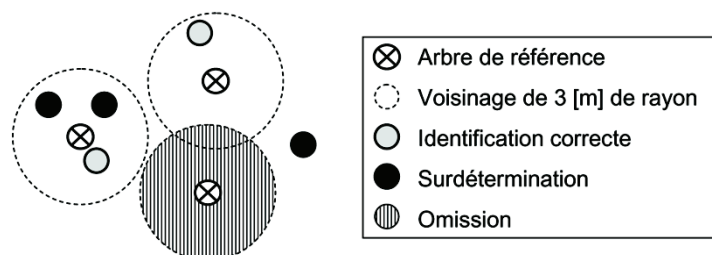


Figure 4.12. Illustration des critères permettant de comptabiliser le nombre d'identifications correctes, de surdéterminations et d'omissions.

Le tableau 4.4 donne le nombre total de sommets détectés (a), ainsi que le nombre de sommets marqués comme correctement identifiés (b), pour les 89 arbres composant le secteur de La Fruitière de Bevaix (deux conifères mesurés hors du secteur de base ne sont pas considérés). Les tableaux 4.5 et 4.6 résument pour les deux groupes sélectionnés le nombre total de sommets détectés (a), le nombre de sommets marqués comme correctement identifiés (b), le nombre d'omissions (c) et le nombre de surdéterminations (d).

	MNH sans filtrage				MNH avec filtre gaussien			
	3m	5m	7m	Var	3m	5m	7m	Var
TIN	135/79	70/59	55/52	115/69	71/65	59/57	51/52	69/62
IDW	84/60	62/51	49/43	79/58	61/53	57/52	47/42	60/52

Tableau 4.4. Résultats pour le site complet, soit les 89 arbres: a/b

	MNH sans filtrage				MNH avec filtre gaussien			
	3m	5m	7m	Var	3m	5m	7m	Var
TIN	63/24/1/38	27/15/10/2	17/13/12/0	51/19/6/26	25/19/6/0	20/17/8/0	15/14/11/0	24/18/7/0
IDW	31/17/8/6	22/15/10/0	15/12/13/0	29/16/9/4	21/14/11/0	21/15/10/0	14/11/14/0	21/14/11/0

Tableau 4.5. Résultats pour le secteur des 25 arbres en collectifs: a/b/c/d

	MNH sans filtrage				MNH avec filtre gaussien			
	3m	5m	7m	Var	3m	5m	7m	Var
TIN	19/16/0/4	17/15/2/2	16/15/3/1	19/16/0/4	18/15/1/0	17/15/2/0	15/14/4/1	18/16/1/0
IDW	19/15/0/1	17/13/2/0	14/11/5/0	19/14/0/1	17/13/2/0	17/13/2/0	15/12/4/0	16/12/3/0

Tableau 4.6. Résultats pour le secteur des 19 arbres individuels: a/b/c/d

INFLUENCE DE LA MÉTHODE D'INTERPOLATION

La méthode TIN donne des résultats plus satisfaisants dans l'ensemble. Elle a permis de détecter correctement 70% et 80% des arbres en collectif et isolés respectivement. La méthode IDW donne des résultats moins bons de 10% environ (tableau 4.7). Cela peut s'expliquer en partie par le fait que la méthode par pondération inverse à la distance lisse de manière sensible le MNH (choix des paramètres peu adaptés). Ce lissage a pour effet d'augmenter le nombre d'omissions en collectif, soit 43% pour l'interpolation IDW et 31% pour l'interpolation TIN. Cette dernière a cependant l'inconvénient de favoriser les surdéterminations en collectif avec 33% en moyenne dans les collectifs pour seulement 5% de surdétermination avec la méthode IDW. On le verra dans les paragraphes suivants, ce problème de surdétermination peut être maîtrisé par un filtrage du MNH ou encore par un choix adapté de la taille de la fenêtre d'analyse.

	IDW		TIN	
	Collectifs	Isolés	Collectifs	Isolés
Correct	56%	68%	70%	80%
Omission	43%	12%	31%	9%
Surdétermination	5%	1%	33%	8%

Tableau 4.7. Synthèse des résultats de détection de sommets (en %) pour les deux méthodes d'interpolation évaluées.

INFLUENCE DU FILTRAGE GAUSSIEN

L'application d'un filtre gaussien a pour but de limiter les surdéterminations de sommets causées par des fortes irrégularités du MNH. L'efficacité a pu être démontrée dans cet exercice (tableau 4.8). Si le pourcentage d'identifications correctes diminue légèrement après filtrage du MNH (4 à 6%), le nombre de surdéterminations a fortement chuté (-46% pour la méthode IDW contre -32% pour la méthode TIN en collectif), voire disparu complètement, au détriment d'une légère augmentation du nombre d'omissions.

	Modèle brut		Modèle filtré	
	Collectifs	Isolés	Collectifs	Isolés
Correct	66%	76%	60%	72%
Omission	35%	8%	39%	13%
Surdétermination	38%	9%	0%	1%

Tableau 4.8. Synthèse des résultats de détection de sommets (en%) pour les modèles bruts et filtrés.

INFLUENCE DU CHOIX DE LA FENÊTRE D'ANALYSE

Sur l'ensemble des expériences, il ressort que la fenêtre 3*3 [m²] sans filtrage donne des résultats peu réalistes à cause du nombre trop important de surdéterminations en collectif (44% en moyenne et 88% sans filtrage). Cela se reporte sur l'analyse avec fenêtre variable qui engendre une surdétermination moyenne de 30% et 60% sans filtrage. Ce problème est spécifique aux secteurs ayant des couronnes très serrées et se révèle être peu pénalisant pour la détection des arbres isolés. On note toutefois quelques surdéterminations possibles sur les couronnes larges et plates des feuillus. Cet inconvénient, plus fréquent avec les petites fenêtres d'analyse, peut se corriger grâce au filtrage gaussien du MNH (figure 4.13).

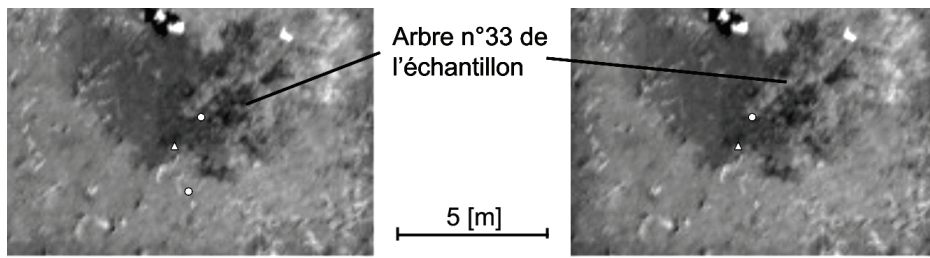


Figure 4.13. Correction de la surdétermination sur les feuillus par filtrage du MNH: le triangle représente la position du tronc mesurée sur le terrain avec le tachéomètre; les cercles représentent les sommets détectés par LiDAR. A gauche, sans le filtrage gaussien, deux sommets sont détectés pour une seule couronne. A droite, après filtrage, seul un sommet demeure.

Source de données: orthophoto; © SITN (www.ne.ch/sitn).

On constate également le nombre d'omissions augmente avec la taille de la fenêtre d'analyse. En collectif on a en moyenne 26%, 38% et 50% pour des tailles de fenêtres fixes de 3 [m], 5 [m] et 7 [m] respectivement. La méthode utilisant une fenêtre de taille variable offre un bon compromis puisque le pourcentage d'omissions est de 33%. Dans une moindre mesure, on constate la même chose pour la détection des arbres individuels avec un nombre d'omissions qui double lorsque l'on passe d'une taille de fenêtre de 5 [m] à 7 [m] avec 11% et 21% d'omissions respectivement.

En ce qui concerne le nombre d'identifications correctes pour les arbres isolés, la plus petite taille de fenêtre d'analyse et la méthode à fenêtre variable donnent les meilleurs résultats avec respectivement 78% et 67% d'arbres détectés. En collectif, la taille de fenêtre intermédiaire (5 [m]) semble plus adaptée avec en moyenne 60% d'identifications correctes pour un taux de surdéterminations faible et un nombre d'omissions acceptable. La méthode utilisant une fenêtre variable peut s'avérer judicieuse à condition de filtrer au préalable le MNH pour éviter un trop grand taux de surdéterminations (60% de surdéterminations avec le modèle brut, alors que ce pourcentage chute à zéro avec l'application d'un filtre gaussien sur le MNH).

	3m		5m		7m		variable	
	Collectifs	Isolés	Collectifs	Isolés	Collectifs	Isolés	Collectifs	Isolés
Correct	74%	78%	60%	74%	50%	68%	67%	76%
Omission	26%	4%	38%	11%	50%	21%	33%	5%
Surdétermination	44%	7%	2%	3%	0%	3%	30%	7%

Tableau 4.9. Synthèse des résultats de détection de sommets (en%) pour différentes tailles de fenêtres d'analyse.

ANALYSE DES RÉSULTATS

Concernant l'identification des arbres isolés, il ressort de l'étude qu'une fenêtre d'analyse de petite taille est à privilégier. L'application d'un filtre gaussien peut se révéler nécessaire lorsque l'on traite un secteur dominé par les feuillus. Les méthodes d'interpolation IDW et TIN donnent des résultats relativement proches. Le nombre d'omissions est généralement plus élevé pour la méthode IDW, mais cela est compensé par un taux de surdétermination plus faible. Finalement, le meilleur résultat pour ce site d'étude a été obtenu avec une fenêtre d'analyse de 3*3 [m²], une interpolation TIN et l'application d'un filtre gaussien sur le MNH. Le résultat est illustré par la figure 4.14.

Paramètres	Arbres détectés	Omissions	Surdétermination
TIN - Gauss - 3*3[m ²]	79%	5%	0%

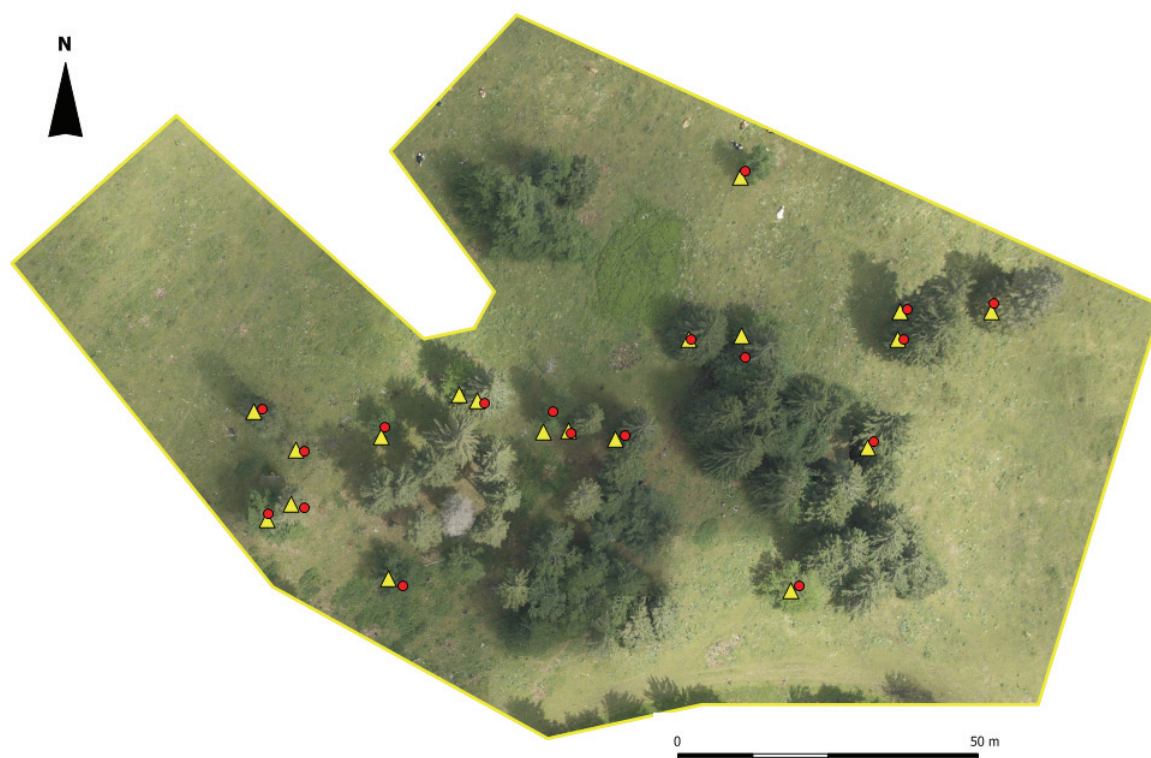


Figure 4.14. Exemple d'un résultat d'identification des arbres isolés par la méthode des maxima locaux: les triangles représentent la position des troncs mesurés sur le terrain avec le tachéomètre; les cercles représentent les sommets détectés par LiDAR (interpolation TIN; traitement du MNH par un filtre gaussien; Taille de la fenêtre d'analyse de 3*3 m).

Source de données: orthophoto; © SITN (www.ne.ch/sitn).

Pour l'identification des sommets en collectif, il est conseillé de lisser le modèle pour ne pas voir le nombre de surdéterminations devenir trop important. L'interpolation avec un filtrage gaussien est une bonne configuration pour éliminer passablement de bruit à la surface des couronnes tout en gardant une bonne séparation des individus. Une taille moyenne de fenêtre d'analyse (5 [m]) ou une taille variable est à préconiser. Ainsi, de bons résultats ont été obtenus pour cette étude avec une fenêtre d'analyse variable, une interpolation TIN et l'application d'un filtre gaussien sur le MNH (figure 4.15).

Paramètres	Arbres détectés	Omissions	Surdétermination
TIN - Gauss - Variable	72%	28%	0%

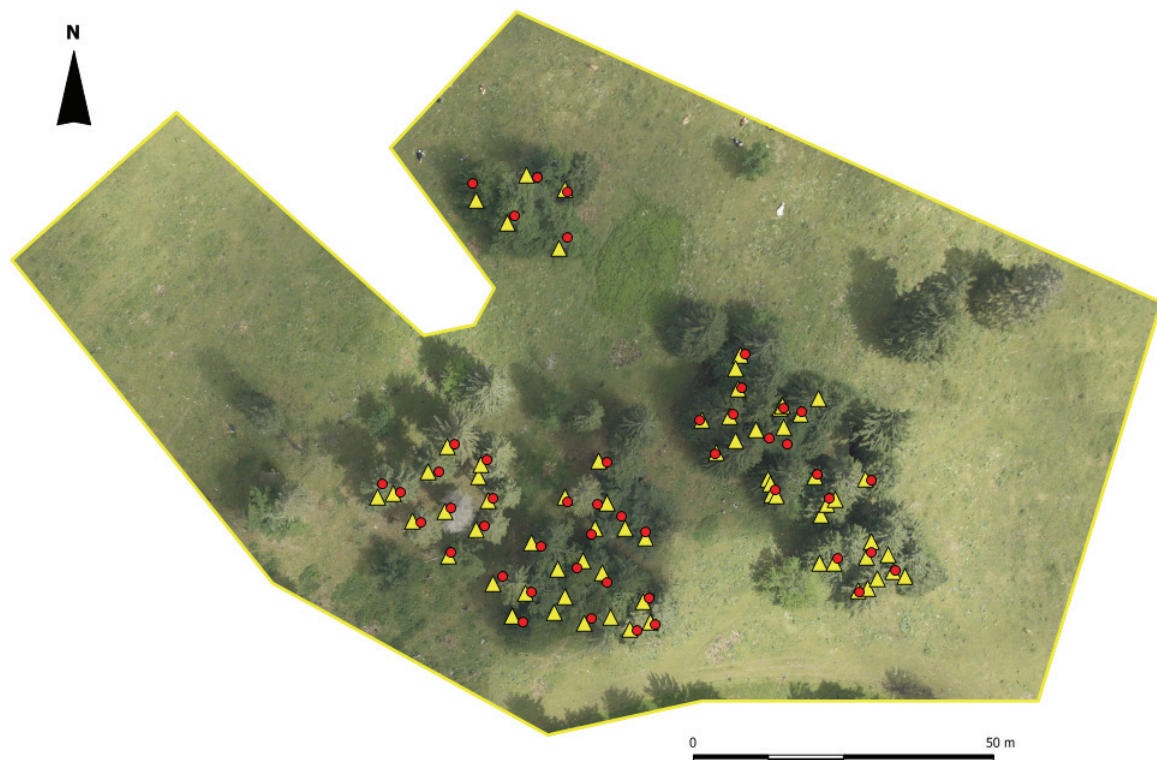


Figure 4.15. Exemple d'un résultat d'identification des arbres en collectifs par la méthode des maxima locaux: les triangles représentent la position des troncs mesurés sur le terrain avec le tachéomètre; les cercles représentent les sommets détectés par LiDAR (interpolation TIN; traitement du MNH par un filtre gaussien; taille variable de la fenêtre d'analyse).

Source de données: orthophoto; © SITN (www.ne.ch/sitn).

4.4.4. APPLICATION SUR LA DIVISION 55 DE LA COMMUNE DE BOUDRY

Pour ce secteur d'un hectare en peuplement fermé, quatre paramètres ayant une influence sur la détection des sommets par la méthode des maxima locaux ont été pris en compte. Les trois premiers paramètres, qui concernent le MNH lui-même, sont la méthode d'interpolation (IDW ou TIN), la résolution du modèle (0.5 [m] ou 1 [m]) et l'influence du filtrage gaussien. Le dernier paramètre concerne la taille de la fenêtre d'analyse. En fonction des premiers résultats obtenus sur le secteur de la Fruitière de Bevaix, uniquement deux variantes ont été retenues: une fenêtre d'analyse fixe de 5 [m] par 5 [m] ainsi que la fenêtre à taille variable en fonction de la hauteur du pixel central.

Afin d'alléger l'analyse sur le secteur, un premier tri a été effectué sur la base du nombre total de sommets détectés. Si une variante propose un nombre total de sommets supérieur ou inférieur de 35%¹ à la réalité terrain (qui est de 156 arbres), elle est automatiquement abandonnée. Plus concrètement, seules les variantes ayant conduit à détecter entre 101 et 211 sommets pour l'hectare ont été retenues pour une analyse plus fine. Le tableau 4.10 résume pour chacune des configurations retenues: le nombre total de sommets détectés pour l'hectare, le nombre de sommets considérés comme correctement identifiés, le

1. Cette valeur a été fixée sur la base d'une analyse visuelle comparative de la distribution des sommets détectés par LiDAR avec la localisation des arbres mesurée durant la campagne de terrain. De manière empirique, un seuil de 35% permet d'éliminer les configurations présentant des résultats marginaux.

nombre de surdéterminations et le nombre d'omissions.

	IDW 0.5 [m]				TIN 0.5 [m]				TIN 1 [m]			
	Brut		Gauss		Brut		Gauss		Brut		Gauss	
	5m	var	5m	var	5m	var	5m	var	5m	var	5m	var
Sommets totaux	113	152	90	104	255	285	190	244	265	333	92	107
Sommets corrects	101	105		99			121					91
Surdéterminations	7	25		5			21					4
Omissions	55	51		57			35					65

Tableau 4.10. Résultats pour la détection des sommets sur le secteur de 1 [ha] sur la division 55 de la commune de Boudry.

INFLUENCE DES PARAMÈTRES DU MNH

Comme cela a déjà été mentionné pour l'analyse des arbres isolés et des collectifs, la méthode d'interpolation TIN génère un MNH très bruité. Le nombre de surdéterminations devient même inacceptable, puisque l'on détecte entre 255 à 333 sommets au lieu des 156 inventoriés. Cette tendance est d'ailleurs d'autant plus marquée lorsque la proportion de feuillus est importante au sein du peuplement. L'application d'un filtre passe-bas, à l'exemple du filtre gaussien, est donc une étape obligatoire.

A l'inverse, la méthode d'interpolation IDW lisse suffisamment le MNH pour ne pas engendrer trop de surdéterminations. Il n'est donc pas nécessaire d'appliquer un filtre gaussien au modèle avant traitement, au risque de sous-estimer massivement le nombre de sommets et créer plus d'omissions.

En diminuant la résolution spatiale du MNH à 1 [m], au lieu de 50 [cm], aucune amélioration significative n'a été apportée. Le nombre de surdéterminations est toujours trop important pour le modèle brut. Le filtrage gaussien ajoute quant à lui un effet de lissage trop important qui se traduit par une augmentation du nombre d'omissions et une diminution de la proportion des sommets correctement détectés.

La variabilité de ces résultats peut déjà en partie s'expliquer par une simple visualisation de l'ombrage des MNH utilisés pour l'analyse (figure 4.16). On peut facilement observer l'aspect plus rugueux (bruité) des modèles calculés par une interpolation TIN. L'effet de lissage engendré par le filtre gaussien est également très net.

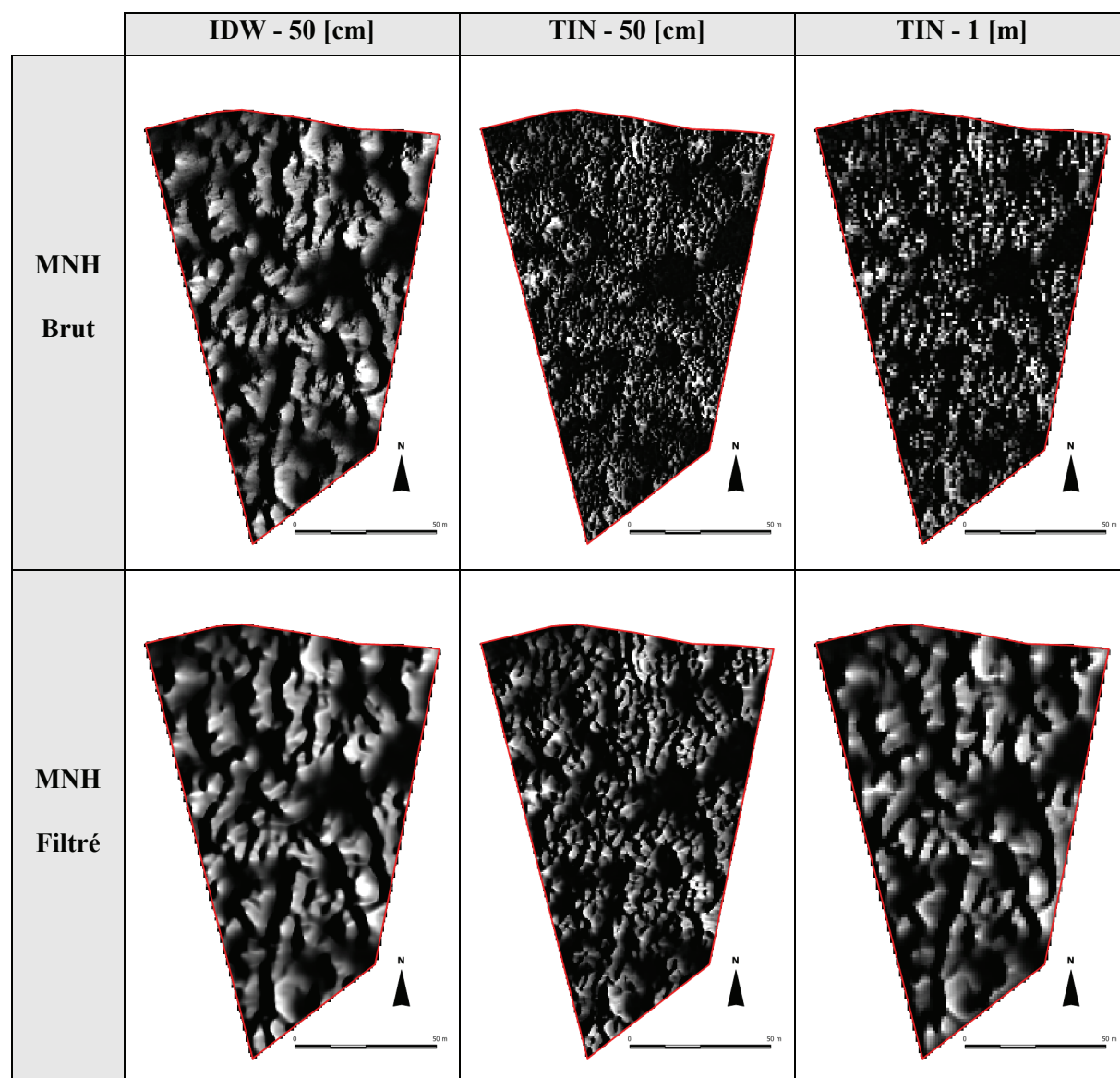


Figure 4.16. Comparaison de l'ombrage des 6 MNH calculés pour l'étude de la détection des sommets dans le peuplement d'I [ha] situé sur la division 55 de la commune de Boudry.

Sources de données: MNS-MNT-MO; © 2001 Données de la mensuration officielle (www.swisstopo.ch).

INFLUENCE DE LA TAILLE DE LA FENÊTRE D'ANALYSE

D'une manière générale, la fenêtre de 5×5 [m²] et la fenêtre à taille variable donnent des résultats assez similaires. La figure 4.17 illustre une comparaison entre ces deux modes de détection. En adaptant la taille de la fenêtre à la hauteur du couvert, on limite les surdéterminations sur les hautes couronnes de feuillus (en blanc sur le MNH), alors que l'on autorise la détection de sommets plus rapprochés pour les hauteurs inférieures (en gris foncé sur le MNH). Ajoutons que sans un lissage adapté du modèle, on observe rapidement des surdéterminations pour les secteurs bas du MNH.

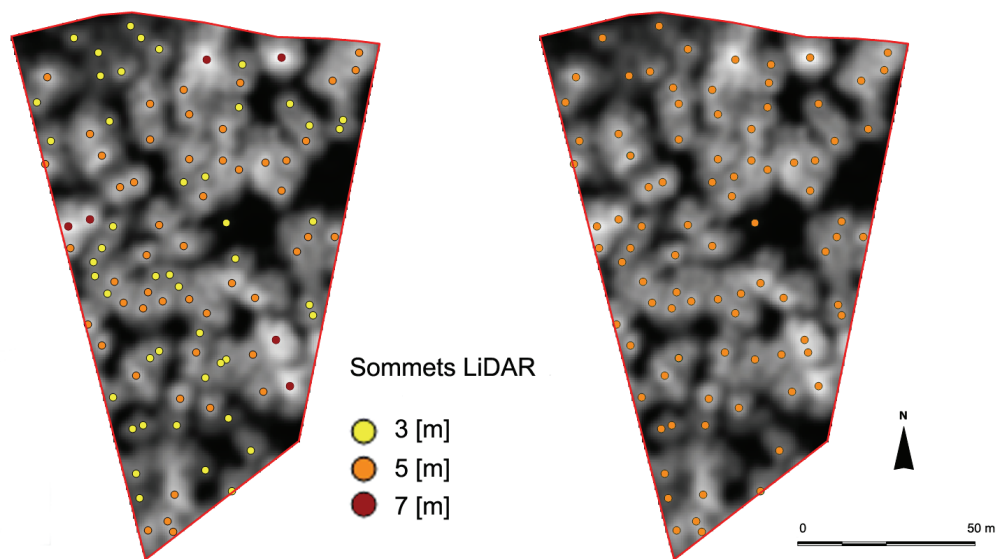


Figure 4.17. Résultats de la détection des sommets (sur le peuplement de la division 55) avec un filtrage avec une fenêtre à taille variable (à gauche) et une fenêtre à taille fixe de 5 [m] (à droite). Le MNH source, d'une résolution de 0.5 [m], est lissé par un filtre gaussien. Les sommets sur l'image de gauche sont représentés par une taille de cercle proportionnelle à la taille de fenêtre dont ils sont issus: 3 [m], 5 [m] et 7 [m].

Sources de données: MNS-MNT-MO; © 2001 Données de la mensuration officielle (www.swisstopo.ch).

Le peuplement étudié montre bien les limites de la démarche qui consiste à vouloir individualiser des couronnes présentant un enchevêtrement complexe. Pour éviter au maximum un trop grand nombre de surdéterminations, il est nécessaire de travailler avec un modèle relativement lissé. En choisissant une résolution et un filtrage du MNH adaptés, on est néanmoins en mesure de caractériser de manière rationnelle le couvert en place. Si l'on se réfère aux statistiques des cinq variantes retenues pour l'exercice, la proportion de sommets correctement identifiés varie entre 58 et 78%, les surdéterminations sont comprises entre 2 et 16% alors que les omissions sont relativement plus élevées et se situent entre 22 et 41%. Les détails se trouvent dans le tableau 4.11.

	IDW 0.5 [m]			TIN 0.5 [m]	TIN 1 [m]
	Brut		Gauss	Gauss	Gauss
	5m	var	var	5m	var
Sommets corrects	64.7%	67.3%	63.5%	77.6%	58.3%
Surdéterminations	4.5%	16.0%	3.2%	13.5%	2.6%
Omissions	35.3%	32.7%	36.5%	22.4%	41.7%

Tableau 4.11. Résumé des pourcentages de sommets correctement détectés, surdéterminations et omissions pour les cinq variantes retenues.

ANALYSE DES RÉSULTATS

Les résultats présentés dans le tableau 4.11 sont nettement dépendants de la méthodologie choisie pour définir les sommets retenus comme correctement identifiés. Le choix d'un rayon de 3 [m] est certainement un peu restrictif, sachant que la position des arbres de référence (marqués par le forestier lors d'une visite sur le terrain) est estimée sur la base d'un ombrage du MNH calculé par une interpolation IDW avec une résolution spatiale de 0.5 [m]. Quoiqu'il en soit, l'étude relative des différents essais garde son intérêt.

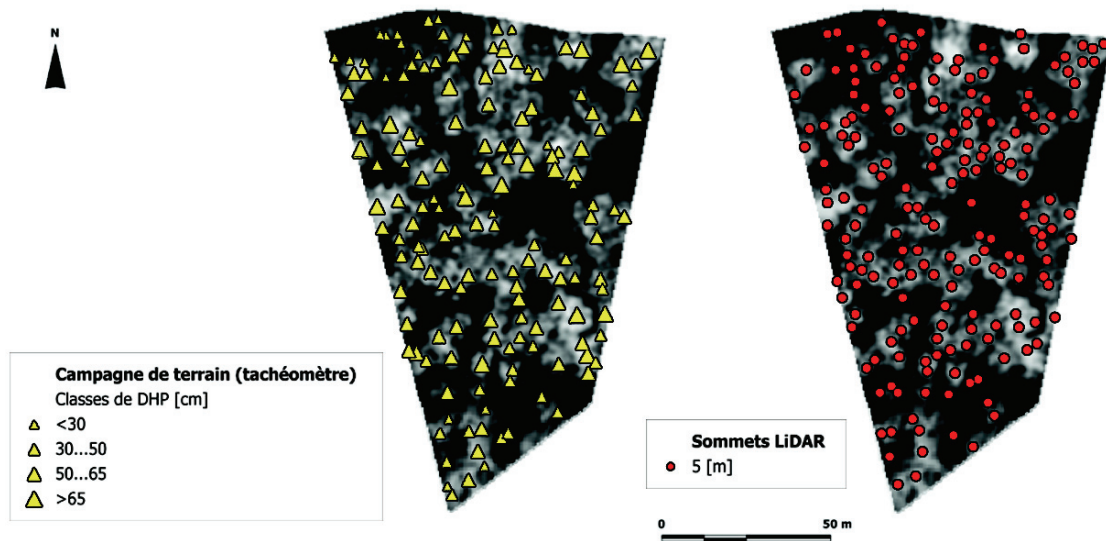


Figure 4.18. Comparaison entre la cartographie de référence des sommets (à gauche) et la détermination des sommets par une fenêtre fixe de 5 [m] (à droite). Les sommets marqués par le forestier font suite à une visite sur le terrain. La taille des triangles est proportionnelle à la valeur du dhp. Les sommets détectés par la technologie LiDAR (ronds) se basent sur un MNH issu d'une interpolation TIN, avec une résolution spatiale de 50 [cm] et lissé par un filtre gaussien.

Sources de données: MNS-MNT-MO; © 2001 Données de la mensuration officielle (www.swisstopo.ch).

Une précision mérite encore d'être apportée concernant la localisation des sommets par la technologie LiDAR. Dans ce chapitre, la localisation des arbres est assimilée à la position du sommet détecté par la recherche des maxima locaux sur le MNH. Ces localisations sont ensuite comparées aux positions des troncs mesurés sur le terrain à une hauteur de 1.30 [m]. Si ce procédé ne pose pas ou peu de problème lorsque le terrain est plat et les arbres droits, des différences plus significatives apparaissent en terrain escarpé ou lorsque les arbres sont penchés. Dans ces conditions, tout décalage planimétrique de la position d'un sommet LiDAR influence sur le calcul de la hauteur et engendre une surestimation de la hauteur réelle (figure 4.19 a) ou au contraire une sous-estimation (figure 4.19 b).

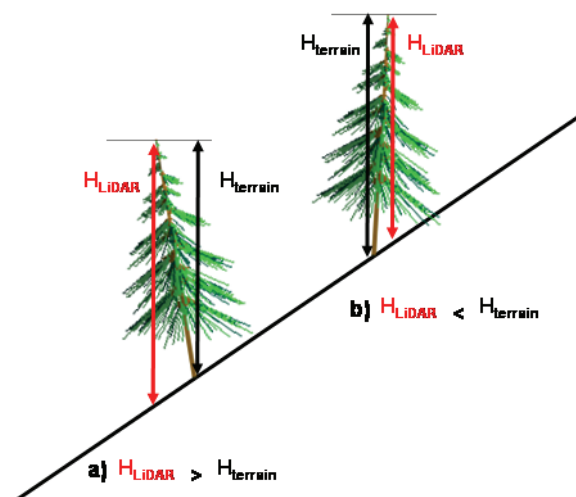


Figure 4.19. Fluctuation de la hauteur LiDAR en fonction de la pente du terrain et de l'inclinaison de l'arbre.

Une analyse des écarts sur les coordonnées x et y entre la position des troncs mesurés sur le terrain et la position des sommets LiDAR est illustrée par la figure 4.20. Pour cet exercice, 15 arbres ayant des troncs verticaux ont été sélectionnés sur le pâturage boisé de La Fruitière de Bevaix. Le biais observé sur l'axe

des coordonnées x s'explique donc par la pente du terrain.

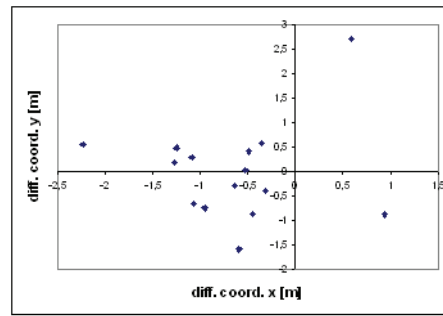


Figure 4.20. A gauche, résultat graphique de l'analyse des écarts de positionnement des troncs entre les mesures de terrain et les estimations dérivées du LiDAR. A droite, profil de la pente selon les mêmes axes de coordonnées x et y .

La moyenne de la valeur absolue des écarts en x est de 83 [cm] avec un écart-type de 0.51 [cm]. La moyenne de la valeur absolue des écarts en y est de 69 [cm] avec un écart-type de 0.31 [cm].

4.5. ESTIMATION DES HAUTEURS INDIVIDUELLES

4.5.1. EXPLOITATION DU MNH RASTER

La méthodologie évaluée repose sur une première détermination des sommets par la méthode des maxima locaux. L'information de hauteur est ensuite ajoutée aux points hauts localisés grâce à l'information du MNH raster.

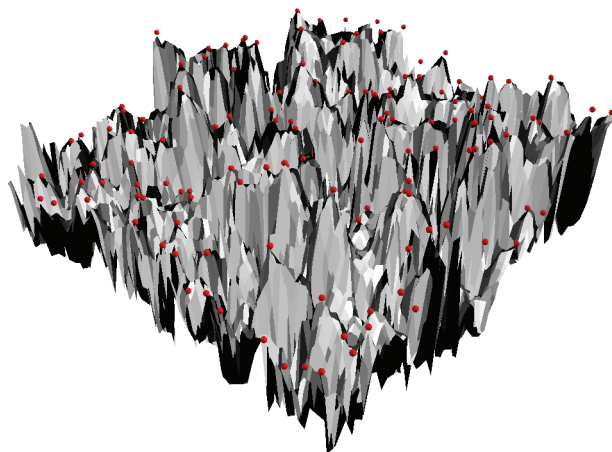


Figure 4.21. Illustration d'un MNH raster avec la couche vecteur des sommets détectés par la méthode des maxima locaux (points rouges).

Sources de données: MNT, MNS; © SITN (www.ne.ch/sitn).

Afin d'assurer une correspondance optimale entre les deux informations (sommets vecteurs et MNH raster), il est fortement conseillé de choisir le MNH qui est à l'origine du calcul de la position des sommets. Dans la pratique, on est fréquemment amené à réaliser les deux traitements lors de la même opération. Pour cet exercice, un MNH d'une résolution de 0.5 [m] a été calculé avec un interpolation TIN. Les paramètres pour la recherche des sommets par les maxima locaux sont: un filtrage gaussien du MNH, une fenêtre d'analyse fixe de $5*5$ [m²] pour les arbres en peuplement et $3*3$ [m²] pour les arbres isolés. Le schéma de la figure 4.22 illustre la chaîne de traitements pour générer en une seule étape l'extraction de la position des sommets et l'ajout de la hauteur à chaque arbre. Pour cette étude, les traitements ont été effectués dans le logiciel ERDAS Imagine 9.1, mais la majorité des outils SIG offrent de telles fonctions

de recouvrement spatial.

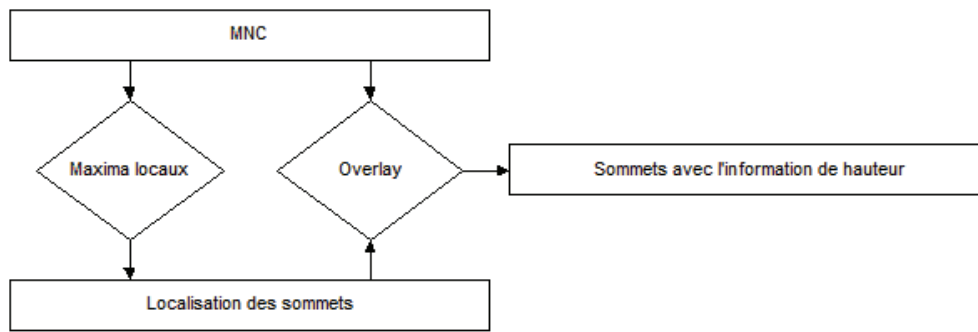


Figure 4.22. Schéma méthodologique pour l'extraction des sommets et l'ajout de l'information de hauteur en une étape.

Cette méthodologie a l'avantage d'être simple, mais présente l'inconvénient d'être entièrement tributaire de la qualité du MNH. Une densité de mesures trop faible au sol engendre un MNT de mauvaise qualité, donc une approximation grossière de l'altitude du terrain, qui peut engendrer des valeurs de hauteur erronées. Un MNH interpolé, même sans avoir été traité par un filtre passe-bas, a tendance à éliminer les cimes des arbres et produit ainsi une sous-estimation générale des hauteurs. Reste maintenant à savoir si ces sources d'erreurs sont significatives ou si au contraire elles restent tout à fait acceptables pour une problématique forestière.

4.5.2. CORRECTION DES HAUTEURS SUR LA BASE DU NUAGE DE POINTS BRUTS

On l'a dit, le MNH interpolé produit un lissage plus ou moins marqué du sommet des arbres. Cela se traduit, d'une part, par un déplacement de la position des sommets dont l'amplitude est plus ou moins grande selon la structure tridimensionnelle de la couronne, et d'autre part, par une *approximation* sur le calcul de hauteur des sommets. Une manière de limiter cet effet consiste à aller rechercher, dans le voisinage de chaque sommet détecté par filtrage, le point brut ayant la valeur la plus élevée (figure 4.23). De cette manière, on espère pouvoir s'approcher au plus près de la position du sommet réel. Pour cette étude, un voisinage de 2 [m] autour de chaque sommet a été considéré. Ce choix se justifie en deux points. Tout d'abord, afin d'éviter de sélectionner un point brut appartenant à un sommet voisin, le voisinage considéré se doit d'être inférieur à la distance moyenne entre les sommets des arbres en collectifs localisés au tachéomètre (environ 4 [m]). Ensuite, le rayon de recherche doit être suffisamment grand pour espérer inclure le point brut le plus haut.

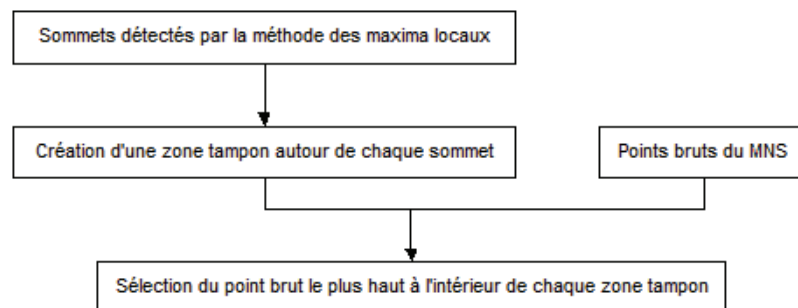


Figure 4.23. Correction des sommets sur la base du nuage de points bruts.

Cette méthodologie, contrairement à l'étude de Tiede et al. (2005) qui procède à l'extraction des sommets directement sur la base du nuage de points bruts, se limite donc à un algorithme simple pour sélectionner le point brut identifié comme nouveau sommet.

4.5.3. APPLICATION AU SITE DE LA FRUITIÈRE DE BEVAIX

HAUTEURS INDIVIDUELLES D'ARBRES EN COLLECTIFS

Les résultats de l'attribution des hauteurs pour les arbres en collectifs (par l'approche illustrée à la figure 4.22) sont résumés dans le tableau 4.12. Les mesures de hauteur ont été attribuées sur la base du MNH brut.

	Total (61)		Conifères (43)		Feuillus (18)	
	diff. [m]	abs(diff.) [m]	diff. [m]	abs(diff.) [m]	diff. [m]	abs(diff.) [m]
Moyenne	-0.79	1.28	-0.95	1.34	-0,33	1.13
Ecart-type	1.59	1.20	1.62	1.30	1.49	0.94
	Total (61)		Conifères (43)		Feuillus (18)	
RMSE [m]	1.75		1.86		1.45	

Tableau 4.12. Synthèse des résultats pour l'analyse des hauteurs d'arbres en peuplement.

Par rapport aux données de terrain mesurées au tachéomètre, l'erreur absolue est de 1.28 [m] avec un écart-type de 1.20 [m]. Les erreurs minimum et maximum sont respectivement de 0.04 [m] (A33) et 6.92 [m] (A3). Sur ce secteur, il n'y a pas de différence significative entre les hauteurs moyennes calculées sur les feuillus ou les conifères. La figure 4.24 illustre la localisation des 61 arbres utilisés pour l'analyse.

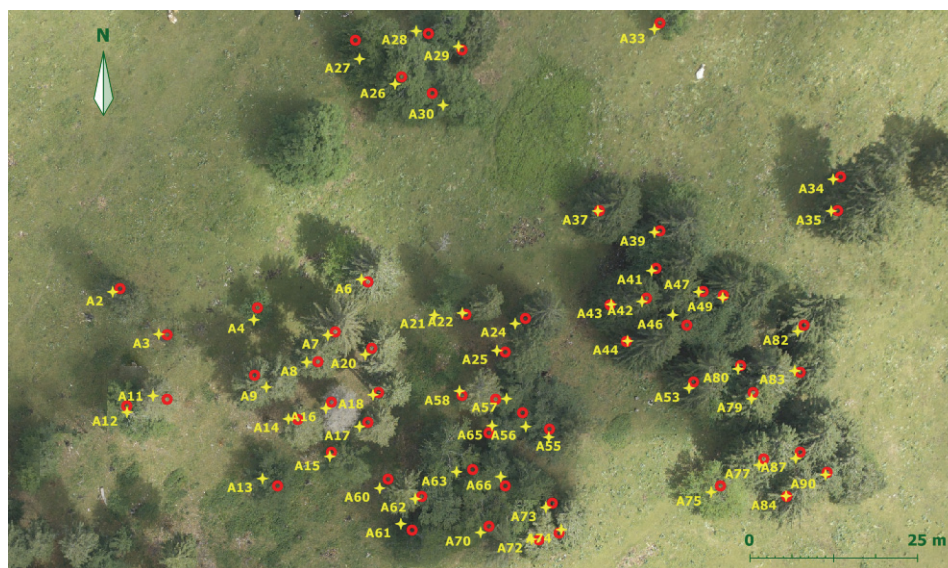


Figure 4.24. Mesures des hauteurs d'arbres pour le secteur n°1: 61 arbres (43 conifères et 18 feuillus). Les croix marquent la localisation des arbres mesurée par tachéomètre (avec le numéro attribué à la mesure). Les cercles positionnent les sommets calculés par la méthode des maxima locaux.

Source de données: orthophoto; © SITN (www.ne.ch/sitn).

HAUTEURS INDIVIDUELLES D'ARBRES ISOLÉS

Une sélection de 17 arbres bien démarqués a permis de faire une étude plus complète en évaluant trois différentes approches:

- Une attribution des hauteurs sur la base du MNH brut (MNH brut).
- Une attribution des hauteurs sur la base du MNH filtré (MNH filtré).
- Une tentative de correction des hauteurs par sélection du point brut le plus haut dans le voisinage des sommets (PB max).

Les résultats sont résumés dans le tableau 4.13.

		Total (17)		Conifères (11)		Feuillus (6)	
		diff. [m]	abs(diff.) [m]	diff. [m]	abs(diff.) [m]	diff. [m]	abs(diff.) [m]
MNH filtré	Moyenne	-0.88	1.19	-1.17	1.22	-0.37	1.13
	Ecart-type	1.79	1.59	2.02	1.99	1.26	0.47
	RMSE [m]	1.95		2.25		1.20	
MNH brut	Moyenne	0.05	0.58	-0.06	0.46	0.26	0.78
	Ecart-type	0.76	0.48	0.55	0.26	1.09	0.73
	RMSE [m]	0.74		0.42		1.03	
PB max	Moyenne	0.98	1.09	0.85	0.91	1.24	1.42
	Ecart-type	1.64	1.56	1.33	1.28	2.22	2.09
	RMSE [m]	1.87		1.52		2.38	

Tableau 4.13. Synthèse de l'analyse des hauteurs d'arbres isolés.

Les meilleurs résultats sont obtenus à l'aide du modèle brut avec une erreur absolue de 0.58 [m] et un écart-type de 0.48 [m] sur le total des 17 arbres. Les erreurs minimale et maximale sont respectivement de 0.02 (A6) [m] et 1.71 [m] (A82).

Le modèle filtré, qui lisse les irrégularités du couvert, accentue de ce fait la sous-estimation de la hauteur des sommets avec une erreur absolue qui double par rapport au modèle brut. De manière générale, l'erreur de mesure sur les feuillus est inférieure à l'erreur sur les conifères. Cette différence est due à la forme géométrique des couronnes. En effet, la cime conique d'un résineux peut facilement être ignorée lors de l'acquisition. Le processus d'interpolation accentue encore le phénomène de lissage. Les couronnes plus arrondies des feuillus limitent en revanche ces erreurs. La correction de la hauteur des sommets par sélection du point brut le plus élevé dans le voisinage n'a pas été concluante pour l'ensemble du site. Cela est essentiellement dû à de mauvais résultats sur les feuillus et spécifiquement deux feuillus pour lesquels on trouve des erreurs absolues de 4.56 [m] (A21) et 5.32 [m] (A75). Ces erreurs inacceptables signifient que le point brut sélectionné comme maxima local n'est en aucun cas l'apex de la couronne et que ce dernier doit se trouver hors du rayon de sélection. La figure 4.25 illustre la localisation des 17 arbres utilisés pour l'analyse.

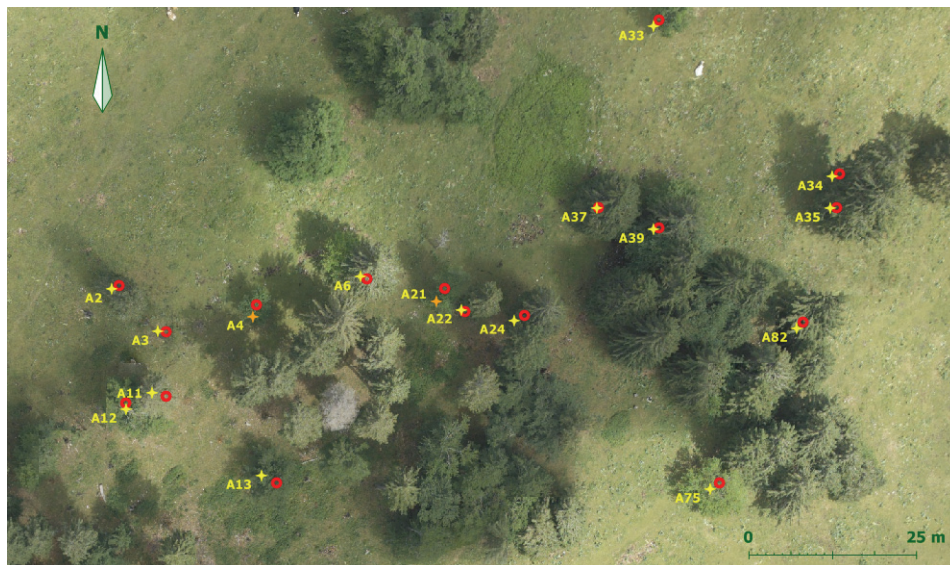


Figure 4.25. Mesures des hauteurs d'arbres pour le secteur n°2: 17 arbres (11 conifères et 6 feuillus). Les croix marquent la localisation des arbres mesurée par tachéomètre (avec le numéro attribué à la mesure). Les cercles positionnent les sommets calculés par la méthode des maxima locaux.

Source de données: orthophoto; © SITN (www.ne.ch/sitn).

RÉGRESSION LINÉAIRE SUR UN ÉCHANTILLON DE 59 ARBRES

Pour compléter l'analyse, une régression linéaire a été effectuée entre les hauteurs mesurées sur le terrain et les hauteurs estimées par LiDAR pour une sélection de 59 arbres dont les sommets LiDAR ont été précisément attribués aux mesures de terrain. Sur les 59 sommets sélectionnés, 36% (ou 21) se trouvaient à moins de 1 [m] de la localisation de l'arbre mesurée sur le terrain, 50% (ou 30) entre 1 [m] et 2 [m] et 14% (ou 8) entre 2 et 3 [m].

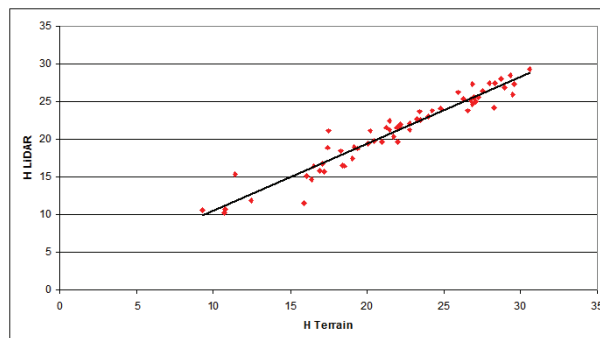


Figure 4.26. Régression linéaire sur un échantillon de 59 arbres.

- Le modèle de prédiction (hauteur terrain à partir des hauteurs LiDAR) donne un R^2 de 0.93, une erreur standard de 1.31 [m] et a pour équation linéaire:

$$Hauteur_{LiDAR} = 1.6149 + 0.8899 \cdot Hauteur_{terrain} \quad (4.3)$$

4.5.4. APPLICATION SUR LE SITE DE LA DIVISION 8 DE BEVAIX

Les 20 arbres mesurés sur le parterre de coupe dans la division 8 de la forêt communale de Bevaix ont permis de réaliser une analyse complémentaire pour estimer la précision des mesures de hauteurs LiDAR dans un peuplement mature. Le tableau 4.14 résume les résultats des mesures de hauteur. Pour chaque arbre y figurent: son identifiant, l'essence, le diamètre à hauteur de poitrine, la mesure de hauteur sur le terrain (H_T), les hauteurs mesurées par LiDAR pour les deux systèmes (H_{S2M} et H_{ALTMS}) ainsi que les écarts et la valeur absolue des écarts entre les mesures LiDAR et les mesures de terrain.

Un MNH raster calculé avec une interpolation TIN et une résolution de 1 [m] a été produit pour chaque jeu de données LiDAR. Le calcul des maxima locaux a pour paramètre une fenêtre d'analyse de taille fixe (5*5 [m²]).

La précision de l'estimation des hauteurs est de l'ordre du mètre, avec une moyenne de la valeur absolue des écarts de 1.13 [m] (écart-type de 0.93 [m]) pour les hauteurs dérivées du système ALTMS et 0.97 [m] (écart-type de 0.81 [m]) pour celles dérivées du système Scan2map. On se situe donc dans la précision des mesures collectées sur le terrain.

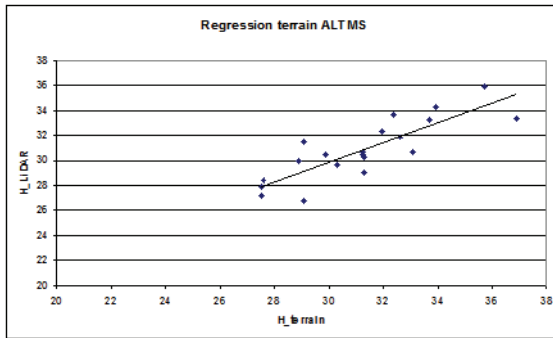
On remarque encore que la différence de densité de mesures entre les deux jeux de données (1 à 2 [pts/m²] pour le système ALTMS et 4 à 5 [pts/m²] pour le système Scan2map) n'est pas assez importante pour marquer une différence significative dans la précision des résultats. Cependant, on observe que les hauteurs ALTMS sont en moyenne inférieures à celles des hauteurs Scan2map de 1.15 [m] sur l'ensemble des mesures. Cet écart est certainement dû au fait que 4 années se sont écoulées entre les vols ALTMS et Scan2map. Cette valeur est réaliste sachant qu'un sapin ou un épicéa en peuplement sont capables de croître jusqu'à 50 [cm] à 1 [m] par année en fonction de leur stade de développement.

Détermination de caractéristiques élémentaires à l'échelle de l'arbre
Estimation des hauteurs individuelles

Essence	DHP [cm]	H _T [m]	H _{ALTMS} [m]	H _{S2M} [m]	H _T -H _{ALTMS} [m]	H _T -H _{S2M} [m]
Epicéa	50	28.88	29.98	30.21	-1.1	-1.33
Epicéa	70	35.70	35.95	36.73	-0.25	-1.03
Sapin	70	31.95	32.32	32.69	-0.37	-0.74
Sapin	65	31.30	30.25	31.66	1.05	-0.36
Epicéa	70	33.91	34.34	35.36	-0.43	-1.45
Sapin	60	31.25	30.44	31.71	0.81	-0.46
Epicéa	70	31.30	29.02	30.18	2.28	1.12
Epicéa	75	36.90	33.35	38.04	3.55	-1.14
Sapin	65	29.90	30.45	31.48	-0.55	-1.58
Hêtre	65	27.60	28.43	28.26	-0.83	-0.66
Sapin	80	30.30	29.65	30.36	0.65	-0.06
Sapin	80	29.08	31.46	32.43	-2.38	-3.35
Sapin	85	27.53	27.20	27.98	0.33	-0.45
Epicéa	65	29.10	26.83	28.82	2.27	0.28
Sapin	70	32.35	33.68	34.71	-1.33	-2.36
Epicéa	60	33.10	30.70	32.58	2.4	0.52
Epicéa	60	32.60	31.88	32.8	0.72	-0.2
Sapin	85	33.70	33.24	33.86	0.46	-0.16
Hêtre	60	27.50	27.86	28.98	-0.36	-1.48
Epicéa	60	31.23	30.72	31.83	0.51	-0.6
Moyenne	70	31.3			0.37 <i>Abs. 1.13</i>	-0.77 <i>Abs. 0.97</i>
Ecart-type		2.6			1.44 <i>Abs. 0.93</i>	1.01 <i>Abs. 0.81</i>

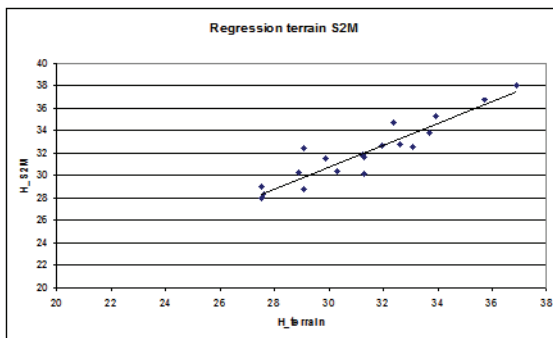
Tableau 4.14. Résultats des mesures de hauteur pour 20 arbres de la division 8 de la forêt communale de Bevaix. Pour le calcul des écarts entre les hauteurs terrain et LiDAR, la valeur moyenne et l'écart-type de la valeur absolue des différences sont ajoutées (Abs).

Une régression linéaire a été effectuée entre les hauteurs mesurées sur le terrain et les hauteurs estimées par LiDAR pour les 20 arbres mesurés. Les modèles de prédictions (hauteur terrain à partir des hauteurs LiDAR) sont bons pour les deux systèmes avec des R^2 de 0.71 et 0.86 pour les systèmes ALTMS et Scan2map respectivement. Les RMSE calculées sont de 1.45 [m] pour les estimations dérivées du système ALTMS 2536 et de 1.25 [m] pour les estimations dérivées du système Scan2map.



$$Hauteur_{LiDAR} = 6.5373 + 0.7790 \cdot Hauteur_{terrain}$$

(4.4)



$$Hauteur_{LiDAR} = 1.7642 + 0.9683 \cdot Hauteur_{terrain}$$

(4.5)

Figure 4.27. Régression linéaire pour l'échantillon des 20 arbres mesurés en peuplement. L'équation (4.4) fait référence aux données LiDAR ALTMS 2536 [1-2 pts/m²]. L'équation (4.5) fait référence aux données LiDAR Scan2map [4-5 pts/m²].

4.5.5. ANALYSE DES RÉSULTATS

En peuplement mixte ou dominé par les feuillus, la meilleure solution consiste à attribuer la hauteur des sommets sur la base d'un MNH non filtré, même si ces derniers ont été délimités avec un modèle filtré. Avec l'utilisation d'un filtre gaussien, le déplacement des points hauts de chaque couronne n'est pas significatif entre les MNH filtré ou brut. On optimise ainsi la localisation des arbres en limitant la surdétermination. L'utilisation du MNH brut pour l'estimation des hauteurs minimise ensuite le phénomène de lissage.

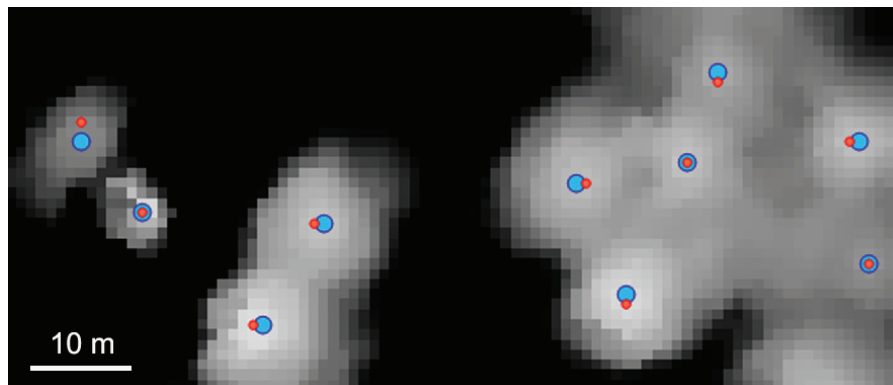


Figure 4.28. Comparaison de la localisation des sommets calculés sur la base de MNH différents: sommets calculés sur la base du MNH filtré (grands cercles); les sommets calculés sur la base du MNH brut (petits cercles). En fond de plan, le MNH filtré. Sources de données: MNT, MNS; © SITN (www.ne.ch/sitn).

La précision que l'on est en mesure d'obtenir, tant au niveau de la localisation des sommets que de l'estimation des hauteurs, est directement dépendante de la géométrie des couronnes et de la densité du couvert. Ainsi, les feuillus et les conifères, de par leurs structures caractéristiques, ont des comportements souvent divergents. La méthode des maxima locaux est bien adaptée aux formes coniques des résineux, mais pose des problèmes de surdétermination ou d'omission sur les couronnes large, souvent entremêlées et plus plates des feuillus. En revanche, l'attribution des hauteurs, une fois le sommet de l'arbre identifié, est moins sensible à la sous-estimation systématique des hauteurs pour les feuillus.

D'une manière générale, la précision des hauteurs estimées par LiDAR est très bonne, de l'ordre du mètre, c'est-à-dire aussi bonne voire meilleure que les méthodes traditionnelles de mesure. Des résultats encore plus convaincants pourraient être obtenus avec des méthodologies qui traiteraient les feuillus et les conifères de manière distinctive. Leur mise en oeuvre est cependant plus contraignante et ne se justifie pas forcément.

4.6. EXTRACTION DES ARBRES REMARQUABLES PAR LEUR TAILLE

4.6.1. MÉTHODE DE L'HISTOGRAMME

La première approche repose sur une identification au préalable des sommets par la méthode des maxima locaux. Un histogramme des hauteurs à l'intérieur de l'ensemble du peuplement permet ensuite d'identifier et d'extraire les arbres les plus élevés. A l'intérieur d'un peuplement donné, la valeur limite pour l'extraction des arbres remarquables est estimée au point d'inflexion qui démarque les gros bois. Celui-ci est donc sensé marquer une limite à partir de laquelle le nombre d'arbres croît moins rapidement que l'augmentation du diamètre à hauteur de poitrine. Une canopée disposant d'un certain nombre d'arbres émergents présente donc un point d'inflexion bien marqué. A l'inverse, celui-ci est plus discret pour une canopée régulière et homogène.

4.6.2. MÉTHODE DU PERCENTILE

Cette approche procède à une analyse statistique en sélectionnant pour un peuplement donné l'ensemble des points bruts LiDAR ayant une hauteur supérieure au 99ème percentile. Il en résulte des «îlots» de points bruts matérialisant les plus hautes cimes. Un processus d'agrégation en deux étapes permet ensuite d'estimer la position du sommet au centre du nuage de points isolé par la première étape de seuillage:

- Création d'une zone tampon englobant chaque nuage de points bruts.
- Calcul du centroïde pour chaque zone tampon.

Cette méthode ne requiert donc pas une localisation préliminaire des sommets par la méthode des maxima locaux, mais peut rendre la distinction entre deux arbres remarquables très proches litigieuse voire impossible (figure 4.29). Seule une rectification manuelle est susceptible de corriger l'erreur.

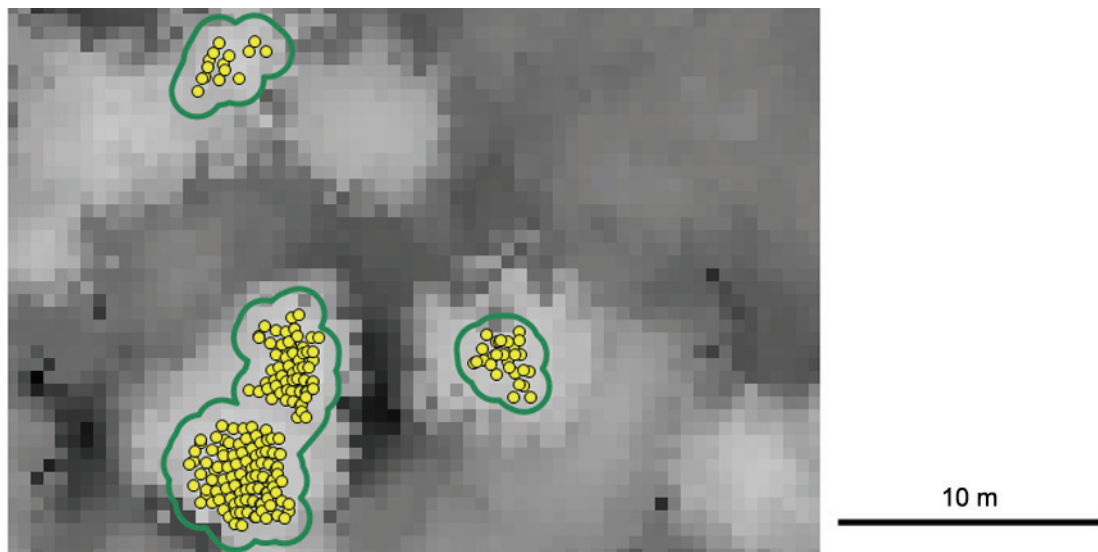


Figure 4.29. Délimitation des arbres remarquables par la méthode des percentiles. Deux nuages de points bruts distincts trop proches (chaque point brut est matérialisé par un cercle) risquent d'avoir une zone tampon commune (ligne en trait gras). Il en résultera un seul centroïde pour deux sommets. Comme image de fond se trouve le MNH (50 [cm] de résolution spatiale). Sources de données: MNT, MNS; © SITN (www.ne.ch/sitn).

L'illustration ci-dessous résume les deux approches pour l'extraction des arbres remarquables.

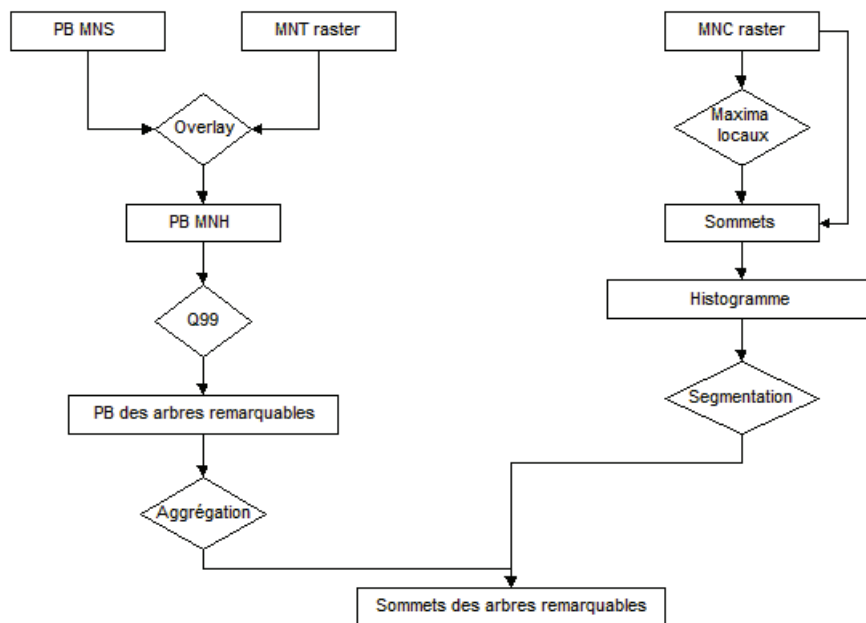


Figure 4.30. Extraction des arbres remarquables.

4.6.3. APPLICATION AU SITE DE LA DIVISION 8 DE BEVAIX

L'histogramme des hauteurs des sommets permet d'adapter la position du seuil en fonction des particularités du peuplement étudié. L'histogramme cumulé facilite encore l'analyse en permettant d'identifier, le cas échéant, un point d'inflexion marquant l'apparition des plus gros diamètres les moins représentés (arbres émergents). La distribution des hauteurs estimées donne ainsi une bonne information sur la structure de la canopée. Pour cet exemple, le seuil a été fixé à 34 [m] (figure 4.31).

La comparaison du résultat avec les arbres remarquables localisés par le forestier montre cependant d'as-

sez grandes différences. Si les très gros diamètres relativement bien dispersés dans le peuplement sont facilement identifiés, nombreux autres individus sont ignorés. Cela s'explique en partie par le fait que les données du forestier ne se basent pas uniquement sur le critère de hauteur, mais qu'elles prennent en compte d'autres caractéristiques comme l'âge, l'esthétique ou certaines particularités physiologiques.

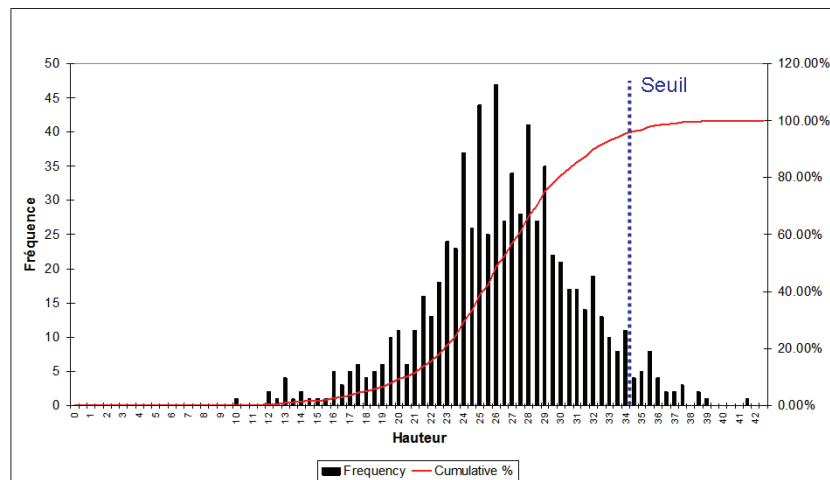


Figure 4.31. Histogramme des hauteurs à l'intérieur d'un peuplement donné.

La figure 4.32 illustre les résultats de l'extraction des arbres remarquables sur la base de l'histogramme des hauteurs de sommets. Les données de référence ont été collectées par le forestier suite à une visite sur le terrain et localisées sur la base d'un ombrage du MNH. Pour le secteur choisi de 5 [ha], 18 sur les 44 arbres remarquables ayant un dhp supérieur ou égal à 70 [cm] ont été correctement identifiés, soit 41%. 7 arbres supplémentaires ont été marqués comme émergents par l'approche LiDAR, mais n'ont pas été reconnus comme tels par le forestier.

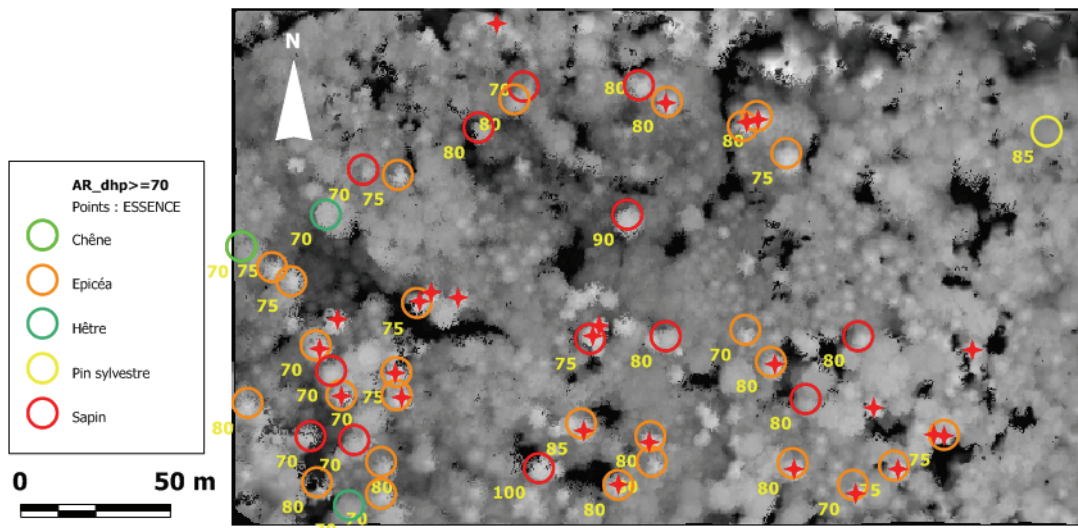


Figure 4.32. Identification des arbres remarquables par seuillage de l'histogramme (seuil des hauteurs = 34 [m]). Les cercles de couleur représentent les arbres remarquables marqués par le forestier. Le chiffre associé indique le diamètre à hauteur de poitrine de l'arbre. Les étoiles rouges identifient les arbres remarquables extraits par l'analyse des hauteurs LiDAR.

Sources de données: MNT, MNS; © SITN (www.ne.ch/sitn).

La figure 4.33 illustre les résultats de l'extraction des arbres remarquables par la méthode des percentiles. De manière empirique, c'est le percentile 99.5 qui a été choisi. Pour le secteur de 5 [ha], 25 sur les 44 arbres remarquables ayant un dhp supérieur ou égal à 70 [cm] ont été correctement identifiés, soit 55%. 10 arbres supplémentaires ont été marqués comme émergents par l'approche LiDAR, mais n'ont

pas été reconnus comme tels par le forestier.

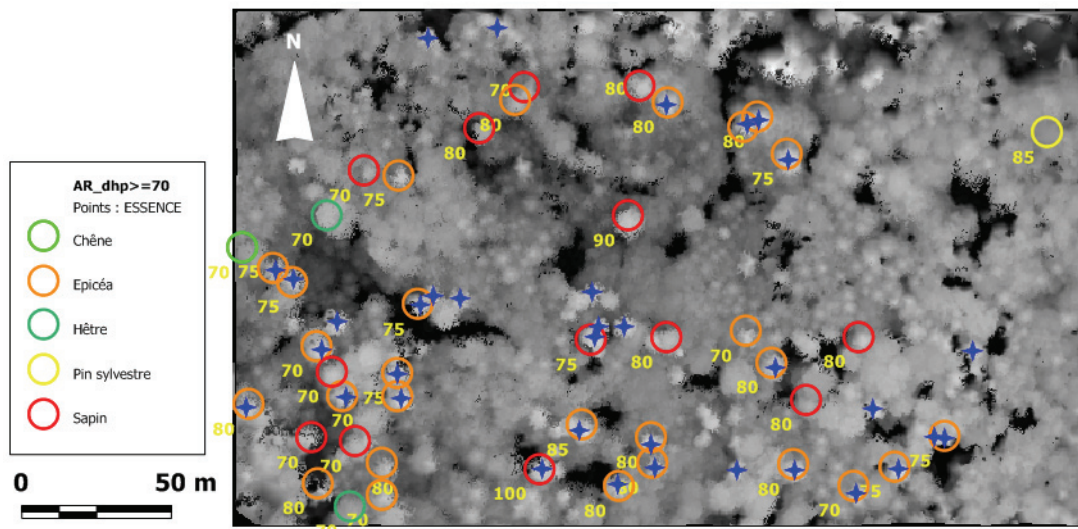


Figure 4.33. Identification des arbres remarquables par la méthodologie des percentiles. Les cercles de couleur représentent les arbres remarquables marqués par le forestier. Le chiffre associé indique le diamètre à hauteur de poitrine de l'arbre. Les étoiles bleues identifient les arbres remarquables extraits par l'analyse du nuage de points bruts LiDAR.

Sources de données: MNT, MNS; © SITN (www.ne.ch/sitn).

4.6.4. ANALYSE DES RÉSULTATS

La méthode qui consiste à analyser la distribution verticale des hauteurs de sommets LiDAR détectés sur le peuplement offre la plus grande transparence. Il est en effet possible d'appliquer un seuil adapté à chaque type de couvert sur la base d'une analyse statistique préalable. L'histogramme est avant tout un outil simple et très visuel pour aider à extraire les sommets émergents. Cependant, le fait de travailler sur une distribution des sommets nécessite d'extraire les maxima locaux dans une première étape. Cette tâche peut s'avérer difficile.

L'extraction des arbres remarquables sur la base de l'analyse par percentiles donne des résultats relativement similaires à la méthode des histogrammes. Elle repose uniquement sur l'analyse des hauteurs de points bruts et ne nécessite pas le calcul d'un MNH raster. Si le volume des fichiers peut vite devenir un facteur contraignant, le découpage du secteur d'étude en plusieurs tuiles régulières peut répondre en partie à cet inconvénient.

Si le choix du percentile 99 semble être un bon compromis, il serait intéressant de faire une analyse de sensibilité plus complète afin d'identifier de manière robuste l'influence d'une variation de ce facteur. Une analyse statistique générale des hauteurs de points bruts sur l'ensemble d'un secteur permettrait notamment d'analyser plus spécifiquement la hauteur des points bruts pour un percentile donné, ainsi que le nombre de points bruts se trouvant au-dessous et au-dessus de cette valeur (figure 4.34).

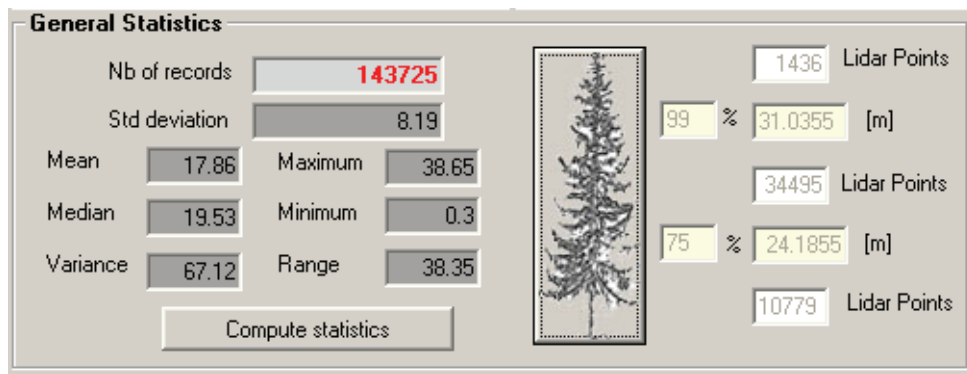


Figure 4.34. Informations statistiques sur le nuage de points bruts, calculées par l'application ASPL détaillée dans l'annexe D.

Ces informations sont assez délicates à interpréter, mais apportent tout de même des pistes pour estimer le percentile qui permettra d'extraire aussi judicieusement que possible les couronnes des arbres émergents.

L'extraction des arbres remarquables par leur taille est une extension à la problématique des mesures de hauteurs individuelles. Elle repose sur une analyse purement quantitative et de ce fait ne répondra pas forcément aux attentes des forestiers pour qui la vision de l'arbre dans un certain contexte au sein de son peuplement reste primordiale. Néanmoins, la distribution spatiale des arbres émergents au sein d'un peuplement constitue une information supplémentaire pour décrire la structure du toit de la canopée. Il serait par exemple intéressant d'étudier si ce type d'information est corrélé ou non à la richesse de la biodiversité.

Finalement, il est intéressant de remarquer qu'à dhp égal, les sapins sont nettement moins bien détectés que les épicéas sur le secteur de 5 [ha] ayant servi à l'analyse. Il est difficile de se prononcer sans une analyse complémentaire, mais cette constatation laisse à penser que la forme de l'apex de la couronne a une influence sur le processus d'identification des arbres émergents.

4.7. SYNTHÈSE ET CONCLUSION

Lorsque l'on cherche à localiser de manière automatique la position des sommets à l'intérieur d'un peuplement forestier, il faut être attentif à plusieurs points qui conditionnent la qualité et la précision des résultats. Tout d'abord, il faut s'assurer que la densité des mesures LiDAR soit assez élevée pour assurer une discrimination suffisante des couronnes de la canopée. Dans la mesure du possible, il faudra ainsi adapter en conséquence les paramètres méthodologiques à la situation.

Tout d'abord, il est essentiel de prendre en compte la nature du couvert. Lorsque l'on est en présence d'un pâturage boisé, les individus sont relativement bien espacés et il est possible d'utiliser une petite fenêtre d'analyse (3*3 [m] par exemple) pour la recherche des maxima locaux. En revanche, en peuplement dense et complexe, une fenêtre d'analyse moyenne (5*5 [m]) permet de limiter de manière significative les surdéterminations. Le choix d'une fenêtre de taille variable s'avère être un avantage dans un peuplement ayant des structures horizontale et verticale plus hétérogènes.

Ensuite, le type d'essence (spécialement la distinction entre les feuillus et les conifères) a aussi son importance. Les résultats de cette étude montrent notamment qu'une méthode d'interpolation qui atténue les irrégularités très locales (comme l'interpolation IDW) ou alors qu'un filtrage gaussien du modèle source sont à privilégier lorsque l'on traite un peuplement composé par une majorité de feuillus. L'objectif consiste à limiter les surdéterminations dans les couverts dominés par les feuillus sans pour autant

appliquer un lissage abusif qui serait dommageable pour la qualité informative du modèle.

Quoi qu'il en soit, l'identification des sommets par la méthode des maxima locaux ne permet pas d'apporter une information exhaustive sur le nombre de tiges composant un peuplement complexe. Il y aura toujours des arbres ignorés, car masqués par d'autres plus hauts, ou le risque qu'un houppier puisse engendrer deux maxima.

Alors que les pourcentages de détections correctes des arbres isolés avoisine les 80%, cette valeur chute de 10% en moyenne pour des peuplements mixtes. Même si le résultat visuel semble très satisfaisant en forêt dense, il est important de considérer le nombre de sommets détectés par LiDAR comme une information statistique représentative à l'échelle d'un peuplement. Pour être complet, il faudrait notamment analyser en parallèle la structure verticale du couvert pour détecter la présence des peuplements étagés et ainsi faire une estimation du nombre de tiges potentiellement masquées par la canopée. Cette analyse de la structure verticale du couvert est approfondie dans le chapitre 6 dédié à la description des peuplements et plus spécifiquement l'analyse de cartographies statistiques portant sur la distribution des hauteurs de points bruts.

En ce qui concerne plus spécifiquement l'estimation de la hauteur des arbres individuels, il a pu être démontré que les modèles LiDAR permettent d'atteindre une précision équivalente, voire supérieure, aux méthodes traditionnelles d'inventaire. Cette information est d'autant plus intéressante qu'elle est facile à obtenir, même dans les secteurs dangereux ou difficiles d'accès par voie terrestre. Les deux jeux de données exploités en parallèle pour l'estimation des hauteurs d'arbre en peuplement ont montré des résultats très proches avec des RMSE de 1.45 [m] et 1.25 [m] pour les données issus des systèmes ALTMS 2536 (1-2 [pts/m²]) et Scan2map (4-5 [pts/m²]) respectivement.

Les deux approches proposées pour l'extraction des arbres remarquables présentent des résultats similaires. Le calcul de l'histogramme des hauteurs de sommets présente cependant l'avantage de fournir une représentation synthétique de la distribution des plus grands arbres d'un peuplement. Il est alors possible d'ajuster au cas par cas la valeur seuil qui permettra d'extraire automatiquement une sélection des plus grands arbres d'un peuplement.

Au vu des résultats présentés dans ce chapitre, il est raisonnable d'affirmer, que tant pour la localisation des arbres individuels que pour l'estimation d'une hauteur, les modèles altimétriques LiDAR sont en mesure d'apporter une information utile et objective au praticien.

Il convient cependant d'apporter une précision importante concernant le choix de la méthode d'interpolation. Alors que la méthode TIN permet une modélisation fidèle de la canopée, le choix des paramètres d'interpolation IDW ne s'est pas révélé optimal. Un rayon de recherche de 6 [m] permet d'éviter les «trous» dans la grille résultante, mais implique un lissage significatif du modèle et, par conséquent, ne permet pas une définition fine des variations altitudinales très locales. Ce paramètre a une influence notable sur la validité de la comparaison qui est faite entre les résultats d'identification des maxima locaux selon les MNH de type IDW et TIN.

Dans une problématique de gestion forestière, l'information statistique dérivée du MNH ouvre la voie à de nombreuses applications reposant principalement sur la connaissance de caractéristiques élémentaires à l'échelle de l'arbre. Les exemples concrets qui seront notamment développés dans ce travail concernent: l'étude du taux de boisement (chapitre 7), la classification de la densité du boisé (chapitre 8) ou encore l'estimation du volume sur pied (chapitre 9). Avant d'aborder concrètement les applications directement liées à la pratique forestière, le chapitre suivant complète les travaux réalisés dans le présent chapitre en abordant l'étude des caractéristiques élémentaires à l'échelle d'un peuplement (groupe d'individus).

DÉTERMINATION DE CARACTÉRISTIQUES ÉLÉMENTAIRES À L'ÉCHELLE DU PEUPLEMENT

5.1. PROBLÉMATIQUE

Un peuplement forestier représente une unité d'intervention élémentaire. Il s'agit d'une association d'un grand nombre de végétaux ligneux constituant un tout bien distinct qui se différencie des parties avoisinantes par l'âge, la composition en essence ou la structure. Pour le praticien forestier, le peuplement représente une unité importante qui conditionne le traitement sylvicole spécifique et oriente les prélèvements. Selon l'intensité de la gestion et la complexité des mélanges, un peuplement peut occuper une aire de quelques ares à plus de 10 hectares. Il s'agit d'une entité dynamique (dans le temps et dans l'espace) dont les bordures, souvent diffuses, sont fastidieuses à situer par des relevés terrestres.

Dans un premier temps, le forestier procède à un inventaire sur le terrain afin de recenser les essences, le diamètre à hauteur de poitrine et l'état sanitaire de l'ensemble des arbres se trouvant au-dessus du seuil d'inventaire. Dans un second temps, l'interprétation visuelle d'images aériennes permet d'identifier plus précisément les secteurs forestiers relativement homogènes. Sur la base de l'inventaire et de la photo interprétation, une cartographie de la délimitation des peuplements est ensuite réalisée. On distingue¹: les structures inférieures à 1.5 [m] de hauteur (prés, clairières, recrû,...), les fourrés, les futaies (jeunes, moyennes et vieilles) et les peuplements étagés. Au final, les caractéristiques prises en compte pour la différenciation des peuplements sont:

- la hauteur et la structure verticale
- la structure horizontale (homogénéité de la canopée)
- le mélange forestier
- l'histoire
- la présence de limites administratives

A l'échelle du peuplement, la hauteur dominante est également une notion importante fréquemment utilisée. Il s'agit d'estimer la hauteur des 100 plus gros diamètres par hectare. Cette valeur est l'expression

1. A l'exemple du canton de Neuchâtel

de l'âge d'un peuplement et de la capacité de production de la station sur laquelle croît ce peuplement.

Ce chapitre a pour objectifs d'évaluer plusieurs approches permettant, d'une part, de délimiter automatiquement le contour des peuplements présentant des structures homogènes et, d'autre part, de leur attribuer une hauteur moyenne qui soit la plus représentative possible de la hauteur dominante. Il s'agit d'évaluer de quelle manière, sur l'unique analyse d'un modèle altimétrique LiDAR, il est possible d'extraire rapidement, et de manière objective, un découpage du couvert forestier qui puisse apporter une information utile en vue de réaliser, dans un second temps, une description plus approfondie du peuplement. La méthode proposée pour la délimitation des peuplements homogènes repose sur une segmentation du MNH raster. Ce dernier informe sur la hauteur du couvert (tons de gris), mais offre également une très bonne information sur l'hétérogénéité du toit de la canopée. Une observation attentive du MNH permet par exemple de discerner les structures pommelées, inhérentes aux secteurs feuillus, des structures plus granuleuses typiques des forêts de résineux. L'estimation de la hauteur dominante d'un peuplement par le biais de l'altimétrie laser a été évaluée à travers deux approches complémentaires. La première vise à agréger des hauteurs mesurées à l'échelle de l'arbre, alors que la seconde repose sur une analyse statistique de la distribution verticale du nuage de points bruts.

5.2. ETAT DE L'ART DANS LE DOMAINE DU LiDAR

5.2.1. DÉLIMITATION DES PEUPELEMENTS PAR SEGMENTATION ET CLASSIFICATION

Plusieurs études ont déjà traité de la délimitation automatique des peuplements sur l'unique base des données LiDAR ou la combinaison de celles-ci avec d'autres données de télédétection. De manière générale, les traitements reposent sur l'analyse du MNH raster afin d'en extraire des unités homogènes. Deux méthodologies donnent notamment de bons résultats.

La première, exposée par Diederhagen et al. (2004), procède à une classification non dirigée du MNH dans le logiciel ERDAS Imagine¹. Il en résulte une nouvelle image réduite à cinq classes de hauteur (tons de gris). Une segmentation en plusieurs étapes est ensuite conduite avec la gamme de logiciels MVTec Halcon. La qualité des délimitations automatiques obtenues s'avère dépendante de la structure forestière. Lorsque la canopée est homogène, les résultats sont bons. Dans les forêts plus hétérogènes, l'algorithme de segmentation fonctionne moins bien et présente notamment des difficultés à faire la différenciation entre deux peuplements de hauteur identique, mais composés d'essences différentes. Suite à ces remarques, des corrections manuelles s'imposent.

La seconde méthodologie consiste à réaliser une segmentation multi-résolution (Tiede et al., 2004; Lang et al., 2006). L'ajustement des paramètres permet d'extraire automatiquement les peuplements forestiers. Les objets (polygones) du niveaux de segmentation défini sont ensuite exportés dans un logiciel SIG pour les traitements finaux. La validation du résultat repose sur une comparaison des délimitations automatiques avec une cartographie basée sur des données collectées sur le terrain et relativement subjectives. Les premiers résultats de classification des différents stades de développement de la forêt sont néanmoins prometteurs, même si la différenciation des stades voisins posent encore quelques problèmes. C'est ce type d'approche, plus novatrice, qui a été privilégiée dans ce chapitre.

5.2.2. ESTIMATION DE LA HAUTEUR DES PEUPELEMENTS

Naesset (1997) a rapidement pu démontrer que les données LiDAR permettent d'estimer la hauteur d'un peuplement avec une précision au moins équivalente aux méthodes photogrammétriques basées sur l'interprétation des images aériennes. Il a notamment conduit une étude qui compare trois approches diffé-

1. <http://gi.leica-geosystems.com/LGISub1x33x0.aspx>, décembre 2007.

rentes, appliquées à des peuplements de conifères. La première consiste à réaliser simplement une moyenne arithmétique de la hauteur des points bruts LiDAR tombés à l'intérieur du peuplement. La seconde méthode consiste à affiner le calcul en donnant un poids plus important aux points bruts les plus hauts. Finalement, la troisième méthode procède par un découpage du peuplement en cellules régulières (de 15 à 30 [m] de côté). Une hauteur moyenne est calculée sur la base des mesures les plus hautes à l'intérieur de chaque cellule. Alors que les deux premières méthodes sous-estiment la hauteur moyenne mesurée sur le terrain de 2 à 5 [m], l'approche avec une grille régulière de 20 [m] permet d'abaisser la différence moyenne à moins d'un mètre avec un écart-type de 1.2 [m]. Le même type d'approche a été reprise par Wulder et al. (2000b) qui ont affiné l'analyse en étudiant plus spécifiquement l'influence de la taille de la grille régulière (10*10 [m] à 40*40[m]), le nombre de points bruts à prendre en compte pour le calcul de la moyenne à l'intérieur de chaque cellule, ainsi que la hauteur minimale à considérer. Popescu et al. (2002) complètent l'étude des hauteurs de peuplement en proposant deux nouvelles méthodologies. La première consiste à calculer pour chaque site d'étude les percentiles de la distribution des hauteurs. Cette approche est notamment favorable pour l'estimation de la hauteur maximale d'un peuplement ($R^2 = 0.9$). La seconde méthodologie passe par l'extraction des arbres individuels par la méthode des maxima locaux. Cette dernière est plus adaptée à l'estimation des hauteurs des arbres dominants et co-dominants, qui possèdent un dhp supérieur à 12.5 [cm]. Le modèle de régression obtenu a pour résultat un R^2 de 0.85.

5.3. SITES ET SOURCES DE DONNÉES

5.3.1. LES DIVISIONS 24 ET 45 DE LA FORÊT COMMUNALE DE BEVAIX

Les divisions 24 et 45 de la forêt communale de Bevaix (Neuchâtel) ont été choisies pour l'étude. Ces deux unités d'aménagement sont composées de forêts mélangées. Alors que la division 45 se compose de peuplements très hétérogènes, la division 24 est essentiellement couverte par des peuplements âgés. Pour l'ensemble de la commune, il existe des données complètes d'inventaire, datant de l'automne 1997, ainsi qu'une cartographie des peuplements, réalisée entre 2002 et 2006. Ces informations servent de références principales pour l'évaluation des méthodologies expérimentées.

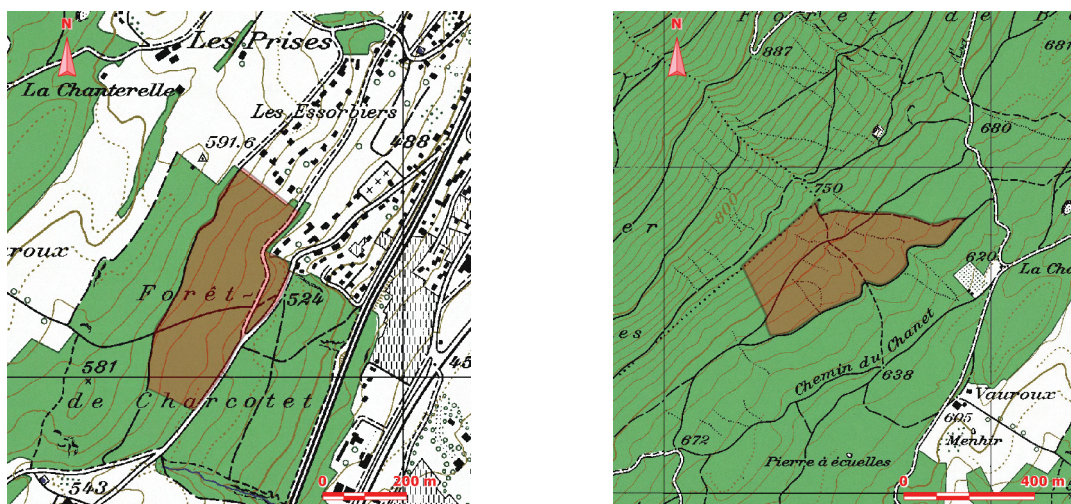


Figure 5.1. A gauche, les limites de la division 45 (Charcotet); à droite, celle de la division 24.
CP25 © 2001 swisstopo (www.swisstopo.ch).

La division 45, d'une surface de 10.7 [ha], est dominée par le chêne. La structure verticale de son couvert est particulièrement hétérogène. Des jeunes peuplements (fourrés, perchis) côtoient des futaies de feuillus d'âges variés (secteurs de jeune, moyenne et vieille futaies). Appartenant au massif de Charcotet,

cette division présente une déclivité monotone dans la direction sud-est du fait de la transition entre les pentes du Jura et les berges du lac de Neuchâtel. La description des peuplements pour la situation équivalente à la date du vol LiDAR a été fournie par l'ingénieur forestier.

La division 24 se situe dans une peuplement de structure plus homogène. D'une surface de 13.6 [ha], elle se compose pour la très grande majorité de peuplements âgés (vieilles futaies, futaies moyennes, et peuplements étagés). Le mélange forestier est dominé par l'épicéa (33%), le hêtre (28%) et le sapin (26%). Cette nouvelle unité d'aménagement permet notamment d'approfondir la distinction entre les différents types de futaies et ainsi confirmer ou non les premiers résultats obtenus sur la division 45.

5.3.2. DONNÉES LiDAR ET ORTHOPHOTOS

Le tableau 5.1 résume les données de télédétection à disposition, ainsi que leurs dates d'acquisition pour les sites traités. Les MNH raster exploités ont une résolution spatiale d'un mètre et sont issus d'une interpolation TIN réalisée par l'application TerraScan¹.

Site	Données LiDAR ^a		Données photographiques (orthophotos RGB)		
	Système	Date du vol	Caméra	Date du vol	Résolution spatiale
Bevaix - division 45	ALTMS	01&02/2001 & 10/2002	DMC Zeiss Intergraph	06/2006	25 [cm]
Bevaix - division 24	ALTMS	01&02/2001 & 10/2002	DMC Zeiss Intergraph	06/2006	25 [cm]

Tableau 5.1. Tableau résumé des données utilisées pour l'étude consacrée à la détermination de caractéristiques à l'échelle du peuplement.

- a. Les données techniques spécifiques aux systèmes LiDAR, ainsi que les paramètres des missions de vol, sont exposés au chapitre 3 «Source et nature des données LiDAR».

5.4. MÉTHODOLOGIE POUR LA DÉLIMITATION DES PEUPELEMENTS

Le MNH constitue une représentation instantanée et précise de la canopée. A l'échelle d'une division ou d'un massif, il souligne la grande rugosité de cette interface fondamentale et confirme clairement la position des lisières externes. La méthodologie évaluée consiste à mettre en place une procédure adaptée pour la délimitation automatique des peuplements par une analyse du MNH au format raster. Ce dernier est assimilable à une image numérique en tons de gris dont l'information spectrale est contenue dans une seule bande. Cette bande informative ne correspond pas à une valeur de luminance, comme c'est le cas pour une image aérienne classique, mais représente la hauteur des objets sur le territoire étudié. Le traitement réalisé avec le logiciel Definiens² a pour objectif de diviser (segmenter) le MNH en régions spatiales homogènes en intensité, en texture ou en couleur. Un filtre gaussien est préalablement appliqué au MNH afin d'atténuer le bruit lié au processus d'interpolation TIN, tout en préservant la haute résolution du modèle. Ce traitement, sans altérer l'information contenue par le modèle, permet d'adoucir le contour des objets créés.

1. www.terrasolid.fi, décembre 2007.

2. Le logiciel Definiens Professional 5 représente la solution commerciale la plus aboutie actuellement en matière d'analyse d'images orientée objet appliquée aux traitements d'images numériques; www.definiens.com, décembre 2007.

5.4.1. SEGMENTATION DU MNH

La segmentation multi-résolution est une technique qui repose sur un algorithme de «Croissance de région». En plus d'exploiter l'information spectrale, le contexte spatial du pixel est pris en compte. Cette procédure itérative est basée sur l'agrégation progressive de pixels ou de régions sous le critère d'homogénéité ou de ressemblance (Caloz & Collet 2001). Un segment naît d'un germe représenté sous la forme d'un pixel ou d'une petite région spectralement homogène. Les pixels sont agrégés au germe si la distance est inférieure à un seuil d'hétérogénéité (spectrale et spatiale) fixé. La surface et, par conséquent, le nombre des segments sont ajustés par un facteur d'échelle. Les principes énoncés ci-dessous sont pour la plupart repris du manuel d'utilisation du logiciel Definiens (Definiens AG, 2006).

Le critère spectral se base sur la somme pondérée des écarts-types des valeurs spectrales de chacune des bandes de l'image:

$$h_{spectral} = \sum_c w_c \cdot \delta_c \quad (5.1)$$

Avec w_c le poids attribué à la bande spectrale c et δ_c l'écart-type des pixels de la bande spectrale c .

Ce critère d'hétérogénéité spectrale est combiné avec un critère d'hétérogénéité spatiale afin de contrôler la forme et la complexité de la délimitation des segments:

$$h_{spatial} = w_{\frac{c}{s}} \cdot h_{comp} + \left(1 - w_{\frac{c}{s}}\right) \cdot h_{sinu} \quad (5.2)$$

Avec $w_{c/s}$ le poids attribué au critère de compacité, h_{comp} la valeur du critère de compacité et h_{sinu} la valeur du critère de sinuosité.

L'hétérogénéité spatiale d'un objet peut être définie de nombreuses façons, notamment comme la tendance à s'éloigner d'une forme compacte ou la tendance à s'éloigner d'une forme aux contours lisses. Le logiciel Definiens prend en compte ces deux notions d'hétérogénéité spatiales à travers un critère de compacité et un critère de sinuosité. Il est possible de définir le poids relatif $w_{c/s}$ des deux critères afin d'appliquer un traitement optimal pour les différents types d'images à traiter.

Critère de compacité:

$$h_{comp} = \frac{l}{\sqrt{n}} \quad (5.3)$$

Il s'exprime comme le ratio entre la longueur l du périmètre de l'objet et la racine carrée du nombre n de pixels composant l'objet. Ce critère prend des valeurs élevées pour les objets qui présentent des formes complexes et des valeurs basses pour des objets compacts.

Critère de sinuosité:

$$h_{sinu} = \frac{l}{b} \quad (5.4)$$

Il s'exprime comme le ratio entre la longueur du périmètre de l'objet l et le périmètre du rectangle circonscrit (bounding box) de l'objet b . Un objet complexe aux limites très sinueuses aura donc une valeur de sinuosité élevée, tandis qu'un objet simple aux limites lisses aura une valeur du critère de sinuosité

basse.

Le critère global d'hétérogénéité est la combinaison des critères d'hétérogénéité spectrale et spatiale:

$$f = w \cdot h_{spectral} + (1 - w) \cdot h_{spatial} \quad (5.5)$$

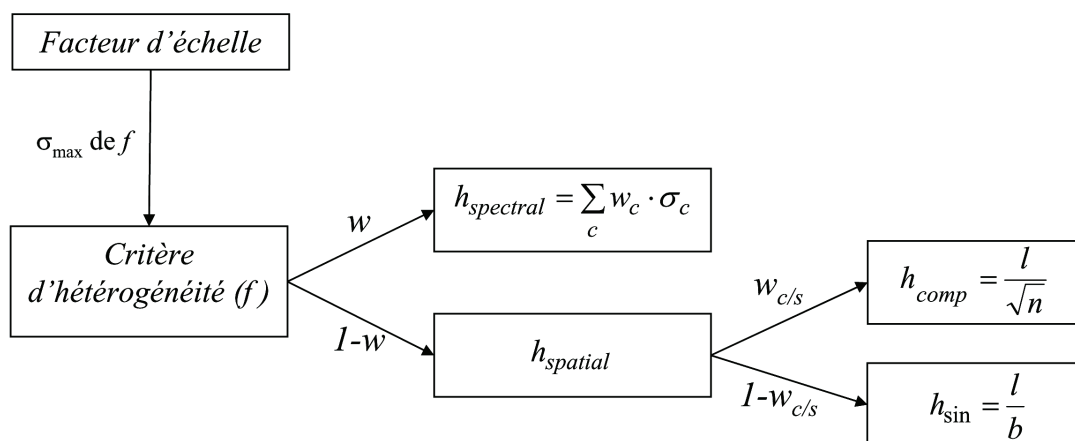


Figure 5.2. Définition du critère global d'hétérogénéité sur la base d'un critère spectral et de deux critères spatiaux.

Le choix des valeurs à attribuer à chacun des paramètres énoncés (w et $w_{c/s}$) est déterminant, car il définit la forme et la taille des objets de l'image. Au terme du processus de segmentation, l'image est alors fragmentée en de nombreuses petites régions. Chacune d'elles contient suffisamment de pixels pour permettre le calcul de paramètres statistiques tels que la variance ou les indices de texture. Le processus de segmentation peut être réédité sur une même image avec différents paramètres. On est ainsi en mesure de créer une hiérarchie d'objets à différentes résolutions, où chaque niveau se rapporte à des primitives objet propres à une thématique donnée. Dans un contexte forestier, on peut par exemple créer trois différents niveaux de segmentation, représentant chacun une échelle d'analyse différente: les contours du boisé, les peuplements jusqu'à l'individu.

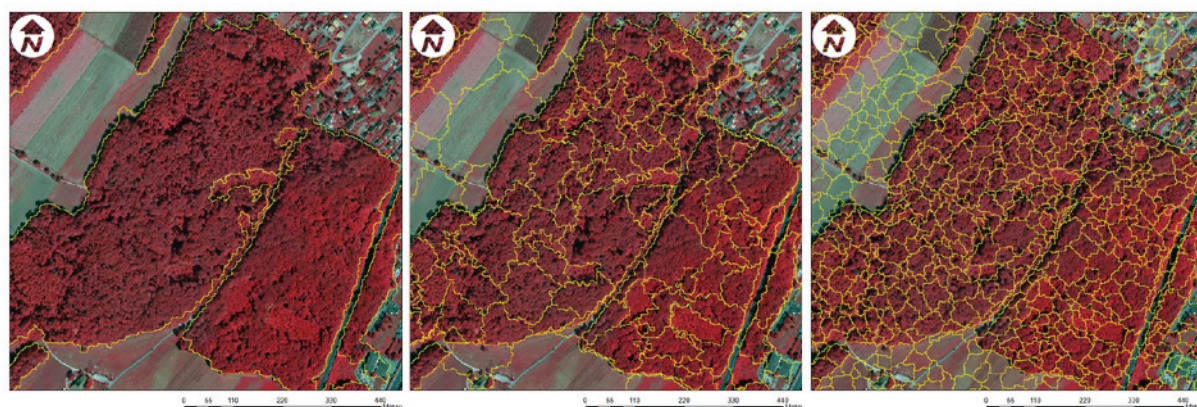


Figure 5.3. Segmentation multi-résolution du massif forestier de Charcotet (Neuchâtel) à l'aide du logiciel Définiens. À gauche, les paramètres de segmentation ont été ajustés pour extraire la forêt, au centre les peuplements et à droite des unités inférieures au peuplement.
Source de données: orthophoto; © SITN (www.ne.ch/sitn).

5.4.2. ANALYSE DE SENSIBILITÉ DES PARAMÈTRES

Les paramètres optimaux de segmentation ont été déterminés par une étude empirique. La qualité de la délimitation automatique des peuplements est basée sur une analyse visuelle, qui consiste à évaluer l'ajustement entre les délimitations vecteur et les variations de tons de gris du modèle numérique de hauteur. Pratiquement, une analyse de sensibilité du facteur d'échelle a tout d'abord été réalisée. Les paramètres «spectral/forme» et «compacité/sinuosité» ont été fixés avec des valeurs neutres, soit 0.5/0.5. Une série de segmentations avec des valeurs allant de 30 à 70 (avec un incrément de 5) a montré que le facteur d'échelle optimal pour une forêt mixte était de 40 (MNH d'une résolution spatiale de 1 [m]). Les combinaisons des paramètres de forme/couleur et de compacité/sinuosité ont été testées dans un second temps, avec un incrément de 0.1 pour un facteur d'échelle fixé à 40. Les résultats détaillés se trouvent dans l'annexe C et font référence à un travail de diplôme réalisé au sein du laboratoire de SIG de l'EPFL (Vietti-Violi, 2007). Il en ressort que le spectral (variation des valeurs de pixels du MNH) doit rester le paramètre dominant pour que la segmentation suive de manière satisfaisante les limites de peuplements. L'indice de compacité est à privilégier sur l'indice de sinuosité, afin de rendre les délimitations moins complexes et plus réalistes en terme de gestion. Pour formuler les choses différemment, la géométrie de polygones délimitant les peuplements se doit d'être simple et généralisée. Les paramètres optimaux retenus pour l'identification d'objets représentatifs des peuplements sont donc les suivants:

- Facteur d'échelle: **40**
- Spectral: **0.7** / Spatial: **0.3**
- Compacité: **0.7** / Sinuosité: **0.3**

La surface des objets créés, comprises entre 150 et 17'000 [m²] est tout à fait adaptée à la problématique de la délimitation des unités forestières telles que les peuplements.

5.4.3. APPLICATION SUR LE SITE DE LA DIVISION 45

Les résultats issus de la segmentation du MNH sont illustrés par la figure 5.4.

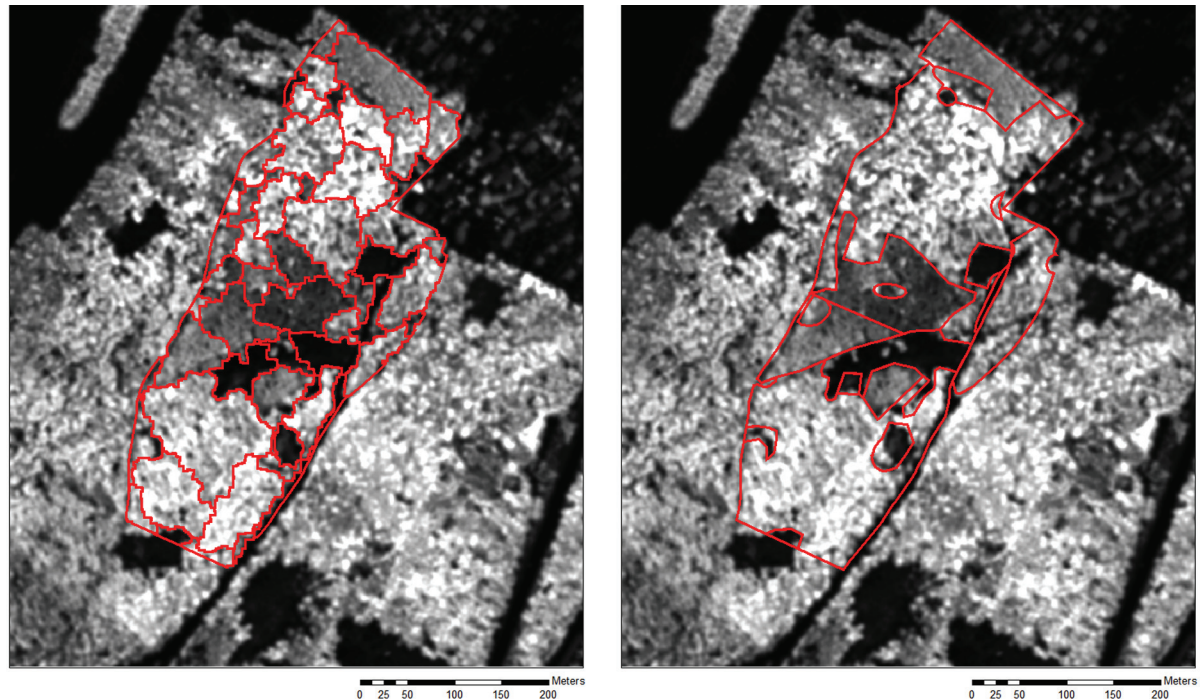


Figure 5.4. A gauche: résultat de la segmentation du MNH sur la division 45 de la forêt communale de Bevaix (Charcotet). A droite: superposition des délimitations de peuplements réalisées par le forestier (description 2002). Source de données: MNS-MNT-MO; © 2001 Données de la mensuration officielle (www.swisstopo.ch).

Si l'analyse visuelle montre que les segments délimitent bien des surfaces homogènes spectralement sur le MNH, la comparaison avec les délimitations du forestier présente des différences majeures. Tout d'abord, les propriétés de l'algorithme de segmentation font que la surface des segments calculés se trouvent à l'intérieur d'une fourchette déterminée par le facteur d'échelle. Le forestier n'a pas cette limitation lors de l'exercice de photo-interprétation, ce qui explique la plus grande hétérogénéité des surfaces de peuplements. Une autre caractéristique de l'algorithme de «Croissance de région» est sa sensibilité à la présence de ligne de rupture, comme un chemin à travers un peuplement homogène ou au contraire la présence d'un mince cordon forestier dans une zone ouverte. Cette propriété peut créer des délimitations qui ne se justifient pas forcément en terme de gestion (figure 5.5).

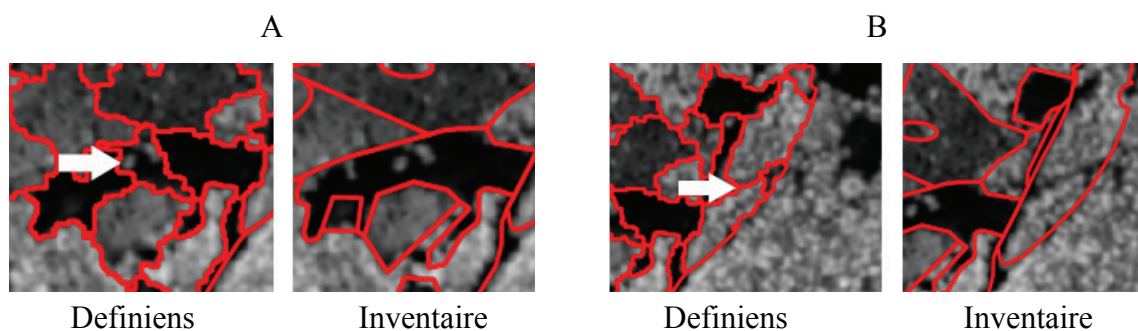


Figure 5.5. Cas A, illustration de la sensibilité du processus de segmentation à la présence d'arbres plus élevés (ou «réserves sous coupe» dans le jargon forestier) coupant un jeune peuplement. Cas B, illustration de la sensibilité du processus de segmentation à la présence d'un chemin forestier traversant un peuplement. Source de données: MNS-MNT-MO; © 2001 Données de la mensuration officielle (www.swisstopo.ch).

Le processus de segmentation du MNH présenté constitue une première phase dans la délimitation des peuplements. Il permet d'extraire rapidement des secteurs dont la hauteur et la texture de la canopée sont homogènes (figure 5.4). En revanche, il ne permet pas encore de produire un résultat suffisamment adapté à la problématique de gestion. En effet, une description plus précise des structures forestières composant chacun des segments semble nécessaire, afin de pouvoir corriger ou agréger cette première délimitation sur des bases tout aussi robustes et objectives.

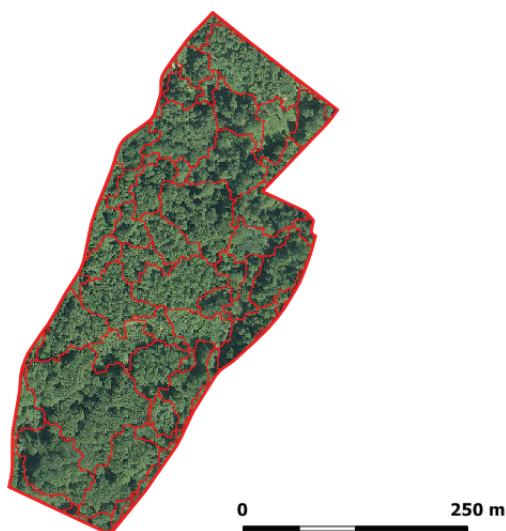


Figure 5.6. Visualisation des délimitations automatiques de peuplements réalisées par segmentation du MNH raster avec pour fond de plan l'orthophoto 2006.

Source de données: orthophoto; © SITN (www.ne.ch/sitn).

5.4.4. APPLICATION AU SITE DE LA DIVISION 24

Le processus de segmentation a été testé sur la division 24 de la forêt communale de Bevaix, afin de vérifier si les remarques énoncées sur la division 45 se confirment. Les mêmes paramètres ont été choisis. Le résultat de la segmentation du MNH sur l'ensemble de la division est illustré par la figure 5.7.

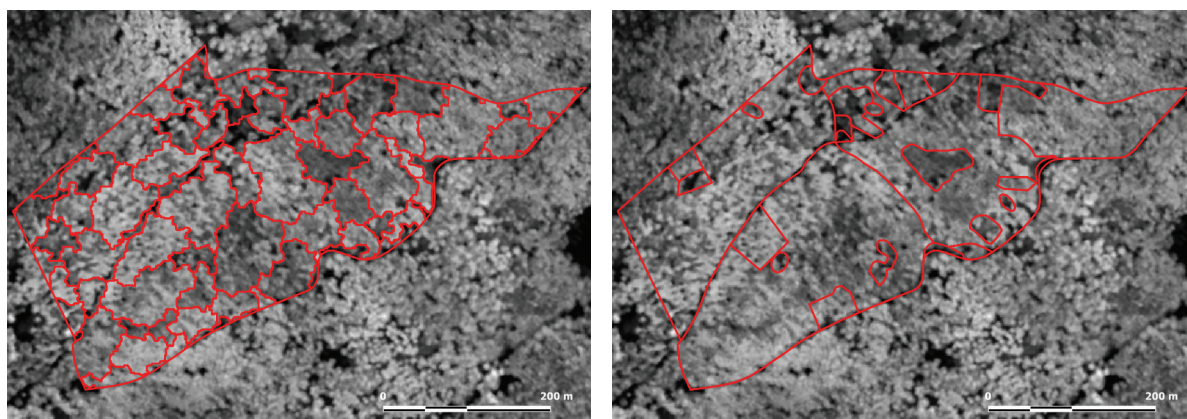


Figure 5.7. A gauche: résultat de la segmentation du MNH (vol LiDAR 2001/2002) sur la division 24 de la forêt communale de Bevaix. A droite: superposition des délimitations de peuplements réalisées par le forestier (cartographie 2005).

Source de données: MNS-MNT-MO; © 2001 Données de la mensuration officielle (www.swisstopo.ch).

La qualité générale des délimitations est similaire à celle obtenue sur la division 45 et les observations relevées lors de la première étude se confirment. L'algorithme par croissance de région, avec les paramètres choisis, est sensible à des variations relativement fines de la structures de la canopée, même lorsque les peuplements sont denses. A partir d'une certaine surface, les trouées en forêt ou les secteurs plus jeunes sont facilement et relativement précisément délimités (figure 5.8).

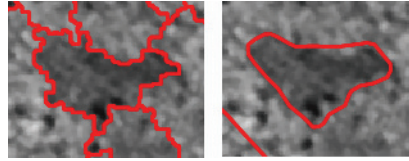


Figure 5.8. Comparaison de la délimitation d'un peuplement de fourrés. A gauche, le polygone tracé automatiquement par l'algorithme de segmentation (Definiens) (vol LiDAR 2001/2002). A droite, le polygone tracé par le forestier (cartographie 2005).

Source de données: MNS-MNT-MO; © 2001 Données de la mensuration officielle (www.swisstopo.ch).

En revanche, le facteur d'échelle sélectionné ne permet pas d'identifier systématiquement les petites trouées en peuplement. Celles-ci sont alors intégrées dans un segment plus général (figure 5.9).

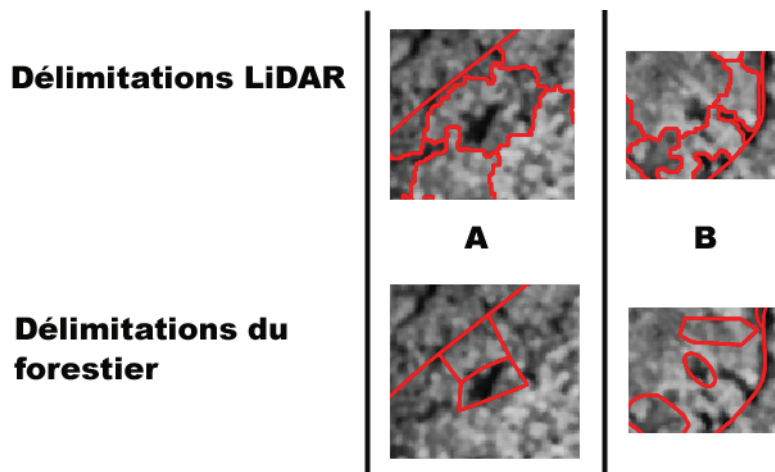


Figure 5.9. Illustration de deux divergences de délimitations de peuplement (A et B) entre l'algorithme de segmentation automatique (vol LiDAR 2001/2002) et la méthodologie classique basée sur l'orthophoto et les connaissances de terrain (cartographie 2006).

Source de données: MNS-MNT-MO; © 2001 Données de la mensuration officielle (www.swisstopo.ch).

Dans cette seconde comparaison, il faut encore prendre en compte les trois années qui séparent le vol LiDAR de la description forestière. Des différences relatives à la croissance du couvert ou à la présence de coupes de bois peuvent créer certaines divergences.

5.5. MÉTHODE POUR L'ESTIMATION DES HAUTEURS DE PEU- PLEMENT

Trois méthodologies différentes ont été évaluées pour la détermination d'une hauteur moyenne de peuplement:

La première approche consiste à calculer la hauteur moyenne de l'ensemble des sommets individuels des arbres de la strate supérieure du peuplement. Les positions des individus sont déterminées par la méthode des maxima locaux (chapitre 4) et leurs hauteurs sont estimées sur la base du MNH brut. La seconde approche est une extension de la première. Elle vise à s'approcher au plus près de la notion de hauteur dominante en calculant la hauteur moyenne sur une sélection des plus hauts sommets ne représentant que

10% de la totalité des arbres détectés. La valeur de 10% a été déterminée de manière empirique et permet de s'approcher au plus près de la hauteur des 100 plus grands arbres par hectare. La troisième approche estime la hauteur moyenne des peuplements par une analyse statistique du nuage de points bruts. Le calcul du 99^{ème} percentile (valeur choisie également sur des bases empirique) de la distribution des hauteurs de points bruts se situant à l'intérieur d'un polygone donné a été implémentée dans l'application ASPL (annexe D). Ainsi, seulement l'information relative à la superficie du couvert est prise en compte. Etant donné que l'on s'intéresse essentiellement à une information portant sur le toit de la canopée, les points bruts se trouvant à une hauteur inférieure à 50 [cm] sont éliminés. On limite ainsi l'analyse à des points de mesure en végétation, ce qui permet d'éviter un certain biais causé par une distribution irrégulière des points au sol.

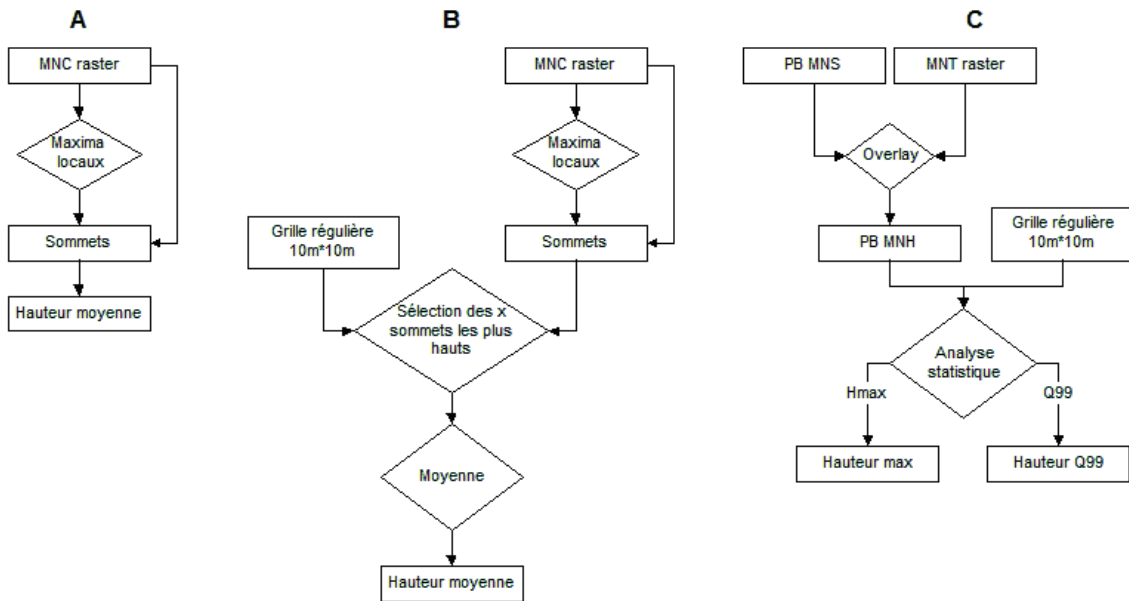


Figure 5.10. Trois méthodes pour l'estimation de la hauteur moyenne d'un peuplement.

5.5.1. APPLICATION SUR LE SITE DE LA DIVISION 45

L'analyse consiste à comparer les cartographies des hauteurs de peuplement basées sur les 3 méthodologies évaluées entre elles (figure 5.11).

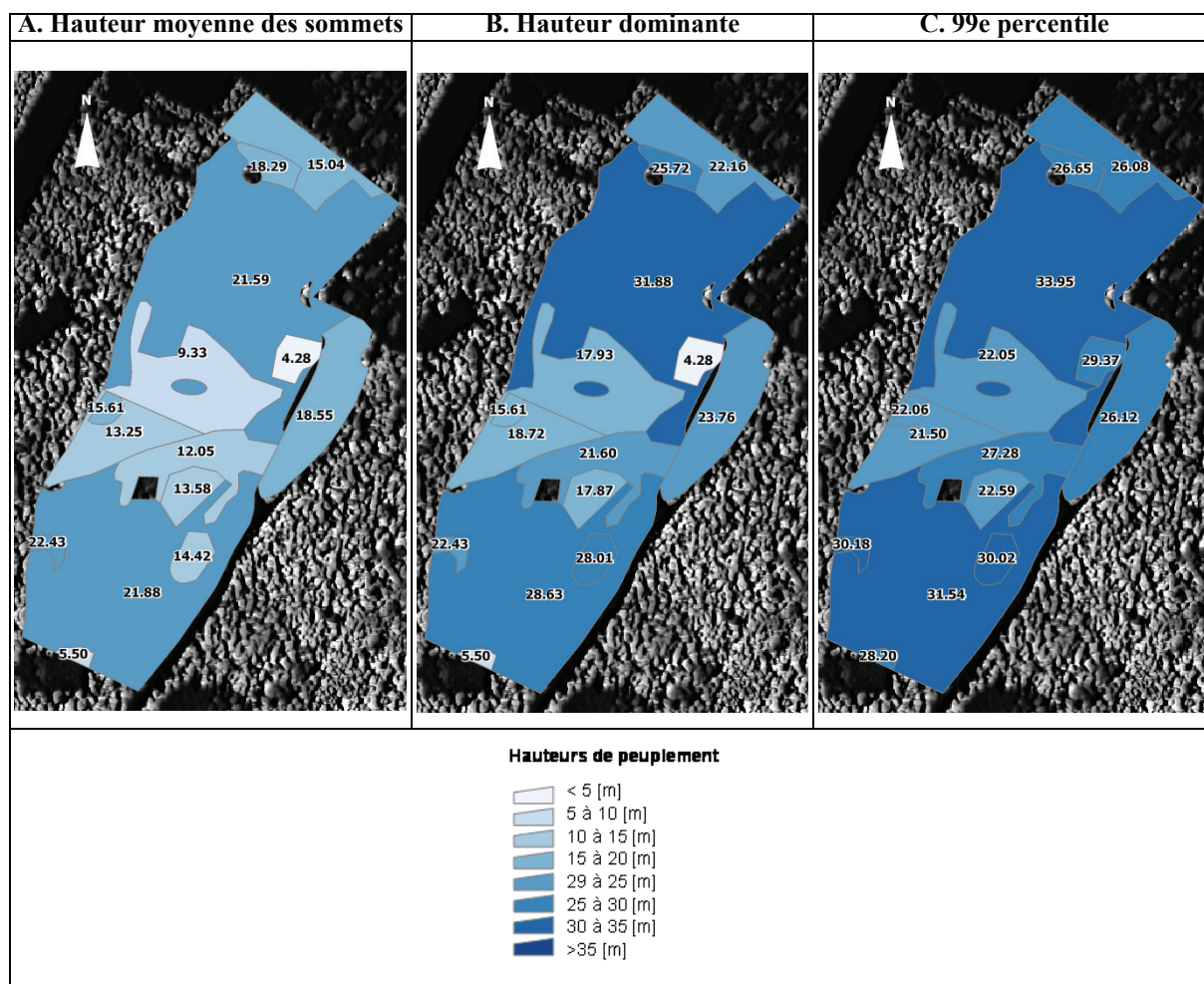


Figure 5.11. Comparaison des résultats de l'estimation de la hauteur des peuplements pour les 3 méthodologies évaluées. Pour chaque polygone sont affichées les hauteurs de peuplement respectives en mètre.

Source de données: MNS-MNT-MO; © 2001 Données de la mensuration officielle (www.swisstopo.ch).

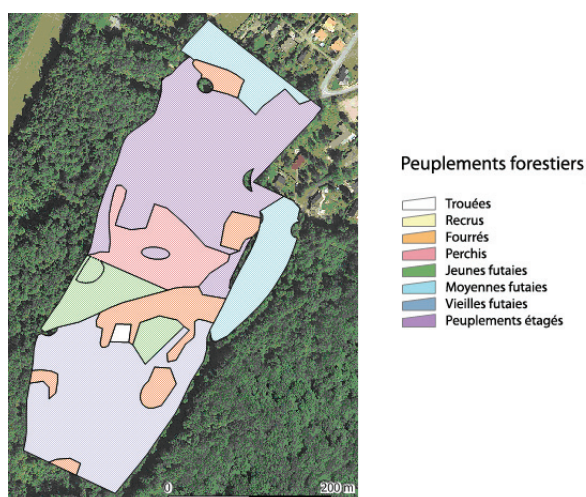


Figure 5.12. Carte des peuplements de la division 45 (Charcotet) sur le 3ème arrondissement forestier du canton de Neuchâtel fournie par le forestier. Source de données: orthophoto; © SITN (www.ne.ch/sitn).

La cartographie des peuplements réalisée en 2002 par le forestier sert de référence pour définir une fourchette de hauteur. Pour rappel, les données d'inventaire datent de 1997 et l'estimation de la hauteur des

peuplements a été réalisée avec des données ALTMS obtenues en 2001/2002 sur la division 45 (Charcotet) du 3^{ème} arrondissement forestier du canton de Neuchâtel.

L'approche qui consiste à prendre en considération les sommets (figure 5.11, cas A) permet en général de bien marquer les différences relatives entre les différents peuplements. Il faut toutefois s'assurer que le nombre de sommets sélectionnés à l'intérieur du peuplement soit significatif. La hauteur moyenne de la totalité des sommets a pour conséquence de donner peu d'importance aux extrêmes et ainsi fournir une information synthétique qui est relativement conforme à la cartographie des peuplements fournie par le forestier. La valeur absolue des hauteurs de peuplements est néanmoins légèrement sous estimée, du fait que des sommets n'appartenant pas à la strate dominante vont être pris en compte dans le calcul. La figure 5.13 complète l'analyse par une cartographie thématique des sommets considérés pour le calcul de la hauteur moyenne des peuplements.



Figure 5.13. Cartographie des sommets détectés sur la division 45 (Charcotet). Les sommets les plus élevés sont cartographiés avec un rayon de cercle plus grand.

Source de données: orthophoto; © SITN (www.ne.ch/sitn).

La méthodologie qui vise à représenter la hauteur dominante (figure 5.11, cas B) calcule la hauteur moyenne sur une sélection des plus hauts sommets du peuplement. Concrètement, les sommets sont ordonnés par leur hauteur et seul le 10% des sommets les plus hauts est considéré pour le calcul de la moyenne. Cette sélection donne donc un plus grand poids à la strate dominante, ce qui peut favoriser la distinction entre certains grands peuplements. Dans notre exemple, la futaie étagée et le peuplement de vieille futaie se différencient par l'approche de la hauteur dominante avec des hauteurs de 31.88 [m] et 28.63 [m] respectivement. Cette différence résulte du poids qui est donné aux arbres émergents présents dans le peuplement irrégulier. La méthode de la hauteur moyenne des sommets ne permet pas une telle distinction, puisque les peuplements étagés et la vieille futaie se voient attribuer des hauteurs de

21.59 [m] et 21.88 [m] respectivement. En revanche, pour les plus jeunes structures, la méthodologie des hauteurs dominantes aura tendance à surestimer la hauteur du peuplement s'il y a la présence de quelques grands arbres dispersés ou en bordure de peuplement. Cette tendance est largement atténuée lorsque l'on considère la totalité des sommets. On peut illustrer ce propos avec l'analyse du secteur de perchis. La méthodologie de la hauteur moyenne des sommets donne une valeur de 9.33 [m] pour le peuplement, alors que l'approche de la hauteur dominante donne 17.93 [m] pour ce même peuplement.

La méthode du 99ème percentile (figure 5.11, cas C) donne à chaque fois des hauteurs supérieures aux deux autres approches. Si la distinction entre les grandes futaies est bien marquée, la hauteur des jeunes peuplements est très nettement surestimée. Cette approche est donc plus spécifiquement dédiée pour l'estimation de la hauteur maximale des peuplements.

5.6. SYNTHÈSE ET CONCLUSION

5.6.1. DÉLIMITATION DES PEUPELEMENTS

De toute évidence, la gestion des peuplements reste une affaire de spécialistes et nécessitera toujours l'expérience et la connaissance du terrain propre aux forestiers. Sans répondre totalement aux besoins des praticiens, la segmentation du MNH LiDAR offre néanmoins une première délimitation des structures forestières homogènes, sur la base de critères spectraux et spatiaux simples. Cette ébauche, qui repose sur une approche objective et facilement reproductible, constitue un appui évident pour la délimitation définitive des peuplements. La collecte d'informations complémentaires, comme le mélange des essences, la structure du sous-bois ou encore la présence de limites administratives, reste cependant nécessaire pour corriger les particularités locales. Il faut cependant garder à l'esprit que le point clé de la méthodologie implique un choix optimum des paramètres: facteur d'échelle, forme/couleur, compacité/sinusité. Par exemple, le fait de fixer un facteur d'échelle implique que les segments générés ont une surface relativement homogène. Cette propriété peut être pénalisante lorsque les structures forestières sont très hétérogènes. L'analyse de sensibilité réalisée pour l'étude de la division 45 a ainsi été essentielle pour définir les paramètres de segmentation les plus appropriés pour la problématique des peuplements. Même si ces paramètres ont ensuite été repris avec succès pour l'étude du second site (la division 24), la solution idéale consisterait à faire une analyse de sensibilité pour chaque unité de gestion, afin d'ajuster les critères de segmentation à la structure locale du couvert. Un tel processus itératif permettrait ainsi d'adapter la sensibilité de l'algorithme à l'hétérogénéité du modèle.

Ajoutons que le MNH raster n'offre qu'une vue du toit de la canopée. Certaines particularités, liées notamment aux strates inférieures, ne pourront être prises en compte. Cette limite est le principal point faible de la méthodologie. Une analyse complémentaire portant sur la distribution des échos LiDAR à travers le couvert semble donc se justifier. Ce type d'investigation est notamment développé dans le chapitre suivant (chapitre 6) qui porte plus spécifiquement sur la description des peuplements. Le MNH seul n'offre pas non plus d'information sur le mélange des essences en place. L'utilisation conjointe des images proche infrarouge en plus du MNH est une voie à investiguer pour affiner la cartographie des peuplements.

Une extension de la méthodologie pourrait également consister à réaliser une segmentation multi-échelle, voire une classification du MNH, qui prendrait en compte de nouvelles caractéristiques portant sur la forme ou le voisinage des objets (segments). Ce type d'opération s'éloigne néanmoins de l'objectif initial qui vise à réaliser un traitement simple et facilement reproductible.

5.6.2. ESTIMATION DE LA HAUTEUR DES PEUPELEMENTS

L'étude sur la hauteur des peuplements réalisée dans ce chapitre n'a pas pour objectif de constituer une analyse exhaustive sur le sujet, mais veut simplement ouvrir quelques voies de recherches à travers les 3 méthodologies présentées. Le fait de travailler sur des délimitations de peuplements tracées par le forestier, et donc basées principalement sur des informations prises sur le terrain, amène un biais. En effet,

une délimitation des peuplements tirée directement de l'analyse du MNH serait plus judicieuse, puisqu'elle assurerait une meilleure cohérence entre le nuage de points bruts ou les sommets détectés par LiDAR et le peuplement.

Si la méthode du 99ème percentile est plus adaptée pour estimer une hauteur maximale de peuplement, l'approche portant sur la hauteur dominante semble la plus prometteuse. Elle est effectivement plus proche de la notion de hauteur dominante utile aux gestionnaires des forêts. Elle a été implémentée dans l'application ASPL afin de pouvoir évaluer, dans des travaux futurs, la sensibilité de la valeur seuil définie pour la sélection des sommets dominants (5%, 10%, 15%,...). Il serait encore intéressant de pouvoir appliquer un filtre qui élimine les sommets émergents dans les jeunes peuplements, et ainsi éviter la surestimation de la hauteur de ces derniers. Une autre possibilité serait de coupler les deux approches basées sur les sommets: la moyenne des jeunes peuplements se ferait sur la totalité des sommets, alors que la hauteur moyenne des futaies serait réalisée par une approche portée sur les sommets dominants. Ajoutons que la validation de ces trois approches sur différents mélanges d'essences serait une perspective intéressante pour compléter la présente recherche.

Le chapitre suivant, consacré à la description des peuplements, porte principalement sur l'amélioration de la connaissance de la structure forestière à l'intérieur de chacune des délimitations initiales issues du processus de segmentation. Afin d'exploiter au maximum le potentiel des données LiDAR, l'analyse ne porte plus uniquement sur les modèles altimétriques au format raster, mais exploite directement l'information contenue dans le nuage de points bruts.

DESCRIPTION DES PEUPLEMENTS

6.1. PROBLÉMATIQUE

L'inventaire forestier, réalisé principalement sur le terrain, est un travail considérable qui requiert de la rigueur et de la précision. Du fait de l'étendue des surfaces forestières à couvrir, la tâche est vite laborieuse et constitue en temps l'une des principales missions de l'ingénieur forestier. Qu'il soit sous la forme d'un échantillonnage par placette, ou «pied par pied», l'inventaire fait appel à une connaissance approfondie de la forêt et nécessite du praticien une interprétation fine et critique des peuplements. Une cartographie forestière précise et actualisée représente un outil de planification, de transmission des consignes ou d'archivage des mesures prises. Elle permet surtout d'inspirer une sylviculture proche de la nature, différenciée; une sylviculture fondée sur l'observation de chaque cas particulier de laquelle découle, si nécessaire, un acte sylvicole correctement dosé, effectué au bon endroit, au bon moment et, qui plus est, guidé par la volonté de ne pas faire partout la même chose.

Ce chapitre a pour objectif d'exposer plusieurs méthodes qui mettent en évidence le potentiel des modèles altimétriques LiDAR pour l'aide à la cartographie des peuplements. Les résultats issus de cette approche ont pour buts de permettre au sylviculteur de mieux documenter ses actions, et à l'aménagiste de mieux observer, localiser, quantifier et contrôler l'évolution de la forêt. Il s'agit de fournir une nouvelle information, objective et facilement dérivable sur de vastes étendues, pour assister le forestier dans son travail d'inventaire et ainsi compléter et faciliter le travail de terrain. L'étude proposée, qui se veut avant tout exploratoire, repose sur une analyse du nuage de points bruts LiDAR. Elle consiste à extraire une information relative à la distribution verticale du couvert à l'intérieur de délimitations préalablement définies. Il s'agit de permettre une différenciation objective entre les structures étagées et les structures forestières moins complexes. Les indicateurs suivants sont calculés:

- Le taux de pénétration des impulsions laser
- La structure verticale estimée par un découpage discret des hauteurs
- L'écart-type de la distribution verticale des échos
- Une cartographie initiale des peuplements

Les cartographies de ces indicateurs sont ensuite validées par comparaison avec des données d'inventaire de référence réalisées par des méthodes conventionnelles. Il s'agira finalement d'évaluer la qualité des résultats et leur potentiel pour dériver une information robuste et synthétique. L'illustration 6.1 résume la démarche générale suivie.

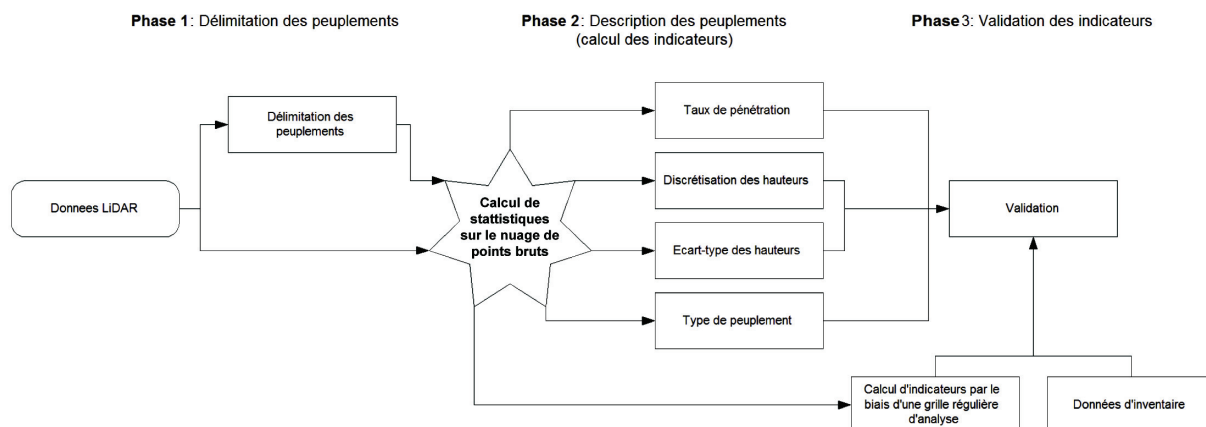


Figure 6.1. Démarche suivie pour l'étude des peuplements.

6.2. ETAT DE L'ART DANS LE DOMAINE DU LiDAR

Même si les impulsions LiDAR ont une plus grande probabilité de toucher le toit de la canopée plutôt que les strates intermédiaires ou le sous-bois, l'analyse de nuage de points bruts en forêt reste une source d'information substantielle pour la description des structures forestières. De simples profils à travers le couvert permettent de révéler des informations relatives à la hauteur du couvert, la présence de trouées et de secteurs de régénération ou encore la structure du sous-bois (Hirata et al., 2003, Lim et al. 2003). Naesset (2004) démontre qu'à partir d'une densité de points bruts d'environ 1 [pt/m²], le nombre de mesures est déjà suffisant pour permettre la reconnaissance des strates inférieures. Il prouve encore qu'une relation directe existe entre la structure des peuplements et la distribution de la hauteur des points bruts. Maltamo et al. (2005) poursuivent l'analyse en mettant en relation les quantiles de la distribution des hauteurs avec la structure verticale. Leurs travaux portent notamment sur l'utilisation d'un algorithme, nommé HistMod, afin d'identifier automatiquement les structures unistratifiées des structures multi-stratifiées. Le principe consiste à analyser le mode de l'histogramme de distribution des hauteurs de points bruts. L'étude réalisée en Finlande, à 150 [km] au nord d'Helsinki, porte sur un site forestier composé principalement d'épicéas. Sur les 28 échantillons étudiés (d'une superficie de 900 [m²] en moyenne), 24 ont été classifiés correctement (uni-stratifiés ou multi-stratifiés). Seuls 4 échantillons ont été classés comme uni-stratifiés alors qu'ils possédaient plusieurs strates. Il ressort de cette étude que le résultat dépend de la densité de la strate dominante. Lorsque le taux de pénétration des impulsions laser est trop petit, la proportion des échos dans les strates inférieures est faible, bien que l'on puisse se trouver en présence d'un sous-bois dense.

Riano et al. (2003) proposent une méthodologie de segmentation des hauteurs de points bruts, basée sur la plus petite distance euclidienne, afin de différencier automatiquement les strates inférieures des strates supérieures. Dans un premier temps, le nuage de points bruts est découpé selon un maillage régulier de cellules ayant 10 [m] de côté. Avec une moyenne de 670 points bruts par cellule, l'échantillon est suffisamment grand pour assurer un nombre de points au sol et calculer des statistiques permettant d'estimer certaines caractéristiques forestières. Une analyse des percentiles à l'intérieur de chacune des cellules est réalisée en première étape dans le but d'extraire les jeunes structures, non susceptibles d'être composées de plusieurs strates. Une approche similaire est aussi proposée par Anderson et al. (2003).

Finalement, Goodwin et al. (2006) proposent une étude de l'effet des paramètres d'acquisition LiDAR sur l'estimation des structures forestières. Les paramètres pris en considération sont: l'altitude de la plate-forme, la densité des points bruts ainsi que l'empreinte au sol. Les résultats montrent que la proportion des combinaison premier/dernier retour diminuent lorsque la hauteur de plate-forme augmente. On arrive à plus de 70% de simples retours lorsque l'on atteint une hauteur de 3000 [m]. Cette constatation est certainement due au fait que l'empreinte au sol augmente avec la hauteur de la plate-forme ce qui impli-

que que l'intensité du signal retour devient insuffisante pour être correctement détectée par le capteur. Plus surprenant, la hauteur de la plate-forme et la densité des mesures n'ont que peu d'effet sur l'estimation des hauteurs de peuplement.

6.3. SITES ET SOURCES DE DONNÉES

Deux sites d'études ont été choisis pour l'analyse: les divisions 24 et 45 de la forêt communale de Bevaix (Neuchâtel). Il s'agit des mêmes secteurs traités au chapitre 5. Ces deux unités d'aménagement sont composées de forêts mélangées. Une cartographie des peuplements réalisée par un inventaire «pied par pied» existe pour chacune d'elles. Cette information sert de référence principale pour l'évaluation des méthodologies expérimentées.

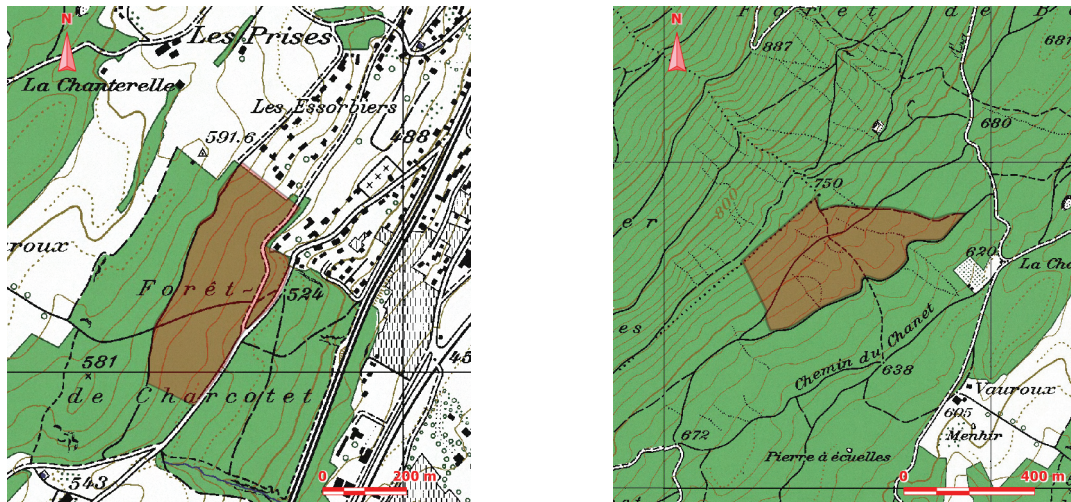


Figure 6.2. A gauche, les limites de la division 45 (Charcotet); à droite, celle de la division 24. CP25 © 2001 swisstopo (www.swisstopo.ch).

6.3.1. LA DIVISION 45 DE LA FORÊT COMMUNALE DE BEVAIX

Cette division d'une surface de 10.7 [ha] est dominée par le chêne. Elle a été spécifiquement sélectionnée pour l'analyse des hauteurs de peuplement, car la structure verticale de son couvert est particulièrement hétérogène. En effet, des jeunes peuplements (fourrés, perchis) côtoient des futaies de feuillus d'âges variés (secteurs de jeune, moyenne et vieille futaie). Appartenant au massif de Charcotet, cette division présente une déclivité monotone dans la direction sud-est du fait de la transition entre les pentes du Jura et les berges du lac de Neuchâtel. Un inventaire intégral pour la situation équivalente à la date du vol Li-DAR a été fournie par l'ingénieur forestier (figure 6.3).

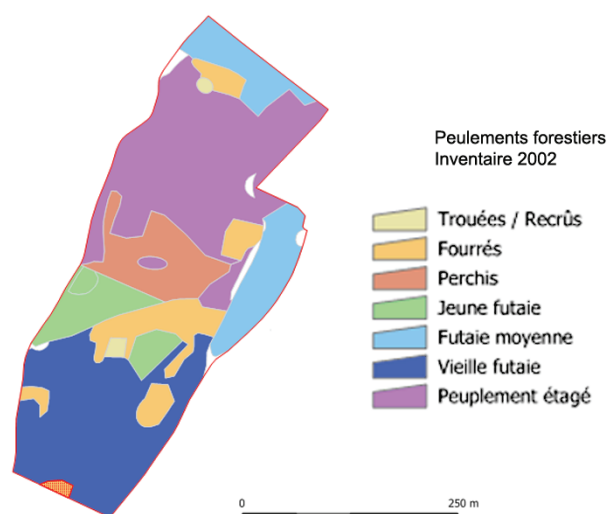


Figure 6.3. Peuplements forestiers de la division 45 de la forêt communale de Bevaix.
Source de données: orthophoto; © SITN (www.ne.ch/sitn).

La cartographie des peuplements forestiers nous informe sur leur hauteur moyenne, leur structure horizontale (distribution des diamètres dominants à l'intérieur du peuplement) et verticale (présence de plusieurs étages de végétation). Une fourchette de hauteur peut ainsi être déduite pour chaque délimitation des peuplements sur la base de la légende détaillée dans le tableau 6.1.

		Description
	1	prés, clairières / trouées en forêt
Jeune forêt	2	recrû libéré (= arbres jusqu'à 1.5 [m] de hauteur) / sous abri
	3	fourré (= arbres entre 1.5 et 5 [m] de hauteur)
	4	perchis (= arbres > 5 [m] de hauteur, jusqu'à 20 [cm] dhp ^a)
Futaies	5	jeune futaie (de 20 jusqu'à 35 [cm] dhp)
	6	futaie moyenne (de 35 jusqu'à 50 [cm] dhp)
	7	vieille futaie (plus de 50 [cm] dhp)
	8	peuplement étagés (sens large)
	9	forêt parcourue par le bétail

Tableau 6.1. Légende des peuplements forestiers pour le canton de Neuchâtel

a. dhp = diamètre à hauteur de poitrine (hauteur sol = 1.30 [m])

Cet inventaire servira donc de référence pour valider et juger des hauteurs de peuplements calculées sur la base des MNH LiDAR.

6.3.2. LA DIVISION 24 DE LA FORÊT COMMUNALE DE BEVAIX

La division 24 se situe dans un peuplement de structure plus homogène. D'une surface de 13.6 [ha], elle se compose pour la très grande majorité de peuplements âgés (vieilles futaies, futaies moyennes, et peuplements étagés). Située à proximité du massif de Charcotet, le mélange forestier est très similaire à la division 45, avec une dominance du chêne. Cette nouvelle unité d'aménagement constitue donc un excellent site pour confirmer ou non les premiers résultats obtenus sur la division 45.

6.3.3. DONNÉES LiDAR ET ORTHOPHOTOS

Le tableau 6.2 résume les données de télédétection à disposition ainsi que leurs dates d'acquisition pour les sites traités. Les MNH raster exploités ont une résolution spatiale d'un mètre et sont issus d'une interpolation TIN réalisée par l'application TerraScan¹.

Site	Données LiDAR ^a		Données photographiques (orthophotos RGB)		
	Système	Date du vol	Caméra	Date du vol	Résolution spatiale
Bevaix - division 45	ALTMS	01&02/2001 & 10/2002	DMC Zeiss Intergraph	06/2006	25 [cm]
Bevaix - division 24	ALTMS	01&02/2001 & 10/2002	DMC Zeiss Intergraph	06/2006	25 [cm]

Tableau 6.2. Tableau résumé des données utilisées pour l'étude consacrée à l'aide au prézonage.

- a. Les données techniques spécifiques aux systèmes LiDAR, ainsi que les paramètres des missions de vol, sont exposés au chapitre 3 «Source et nature des données LiDAR».

6.4. MÉTHODES DE CARACTÉRISATION DES PEUPEMENTS

Le MNH raster renseigne spécifiquement sur la hauteur et la structure horizontale de la canopée. L'analyse du nuage de points bruts constitue donc un pas supplémentaire, par la recherche d'une information plus fine sur la structure verticale des peuplements. En effet, l'analyse de la distribution des échos LiDAR à travers le couvert informe sur la densité du matériel (branche et feuillage) et peut permettre ainsi la différenciation entre une structure complexe, multi-stratifiée, et une structure plus simple, spécifique, entre autre, aux jeunes peuplements ou aux plantations.

Quatre indicateurs² ont été évalués pour cette étude. Les trois premiers permettent de cartographier la distribution des échos LiDAR d'après: l'analyse du taux de pénétration des impulsions jusqu'au sol, la distribution des points bruts selon un découpage vertical discret et l'écart-type de la distribution verticale des points bruts. Le quatrième indicateur consiste à réaliser une cartographie thématique des peuplements sur la base d'une analyse statistique simple du nuage de points bruts.

6.4.1. LE TAUX DE PÉNÉTRATION DES IMPULSIONS LASER

Le taux de pénétration T_p s'exprime par le rapport entre nombre de points bruts ayant atteint le sol PB_{sol} sur le nombre de points bruts totaux PB_{tot} :

$$T_p = \frac{PB_{sol}}{PB_{tot}} \quad (6.1)$$

La connaissance du taux de pénétration à l'échelle d'une unité d'aménagement ou d'un peuplement informe donc sur les conditions durant l'acquisition (période de végétation propice ou non) et permet de localiser les couverts très denses qui ne laissent pas ou très peu pénétrer les impulsions LiDAR. En couplant cet indicateur à une photo-interprétation, la localisation des trouées, caractérisées par un taux de pénétration maximal, est grandement facilitée.

1. www.terrasolid.fi, décembre 2007.

2. Ces indicateurs sont implémentés dans l'application ASPL. Les détails méthodologiques pour ces quatre indicateurs sont décrits dans l'annexe D.

6.4.2. LA DISTRIBUTION DES POINTS BRUTS SELON UN DÉCOUPAGE VERTICAL DISCRET

Cet indicateur consiste à découper le nuage de points bruts en différentes strates de hauteur, afin de discrétiser la distribution verticale des mesures. On est ainsi en mesure d'identifier différents types de distributions propres à différentes structures. Le découpage horizontal du nuage de points bruts se fait à travers une grille régulière (avec des tailles de maille variables, par exemple 5*5 [m²], 10*10 [m²] ou 20*20[m²]) ou sur la base d'un découpage irrégulier comme une limite administrative ou la délimitation d'unités végétales connues. Dans ce deuxième cas, le calcul est déjà plus orienté vers une thématique choisie et l'information dérivée devient plus orientée. Deux paramètres ont été spécifiquement étudiés: le nombre de séparations verticales et la densité minimale des échos à prendre en compte pour qu'une strate de hauteur soit considérée comme significativement occupée.

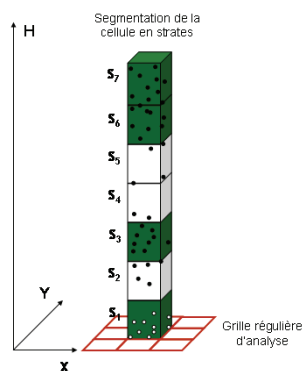


Figure 6.4. Indice de structure verticale sur la base d'une grille régulière d'analyse. Les strates colorées (S_1 , S_3 , S_6 , S_7) ont une densité d'échos LiDAR supérieure au seuil fixé par l'opérateur (généralement entre 10 et 15%). La valeur de l'indicateur qui sera cartographié est la somme des strates considérées comme pleines.

Le calcul de l'indicateur produit un tableau à double entrée qui donne pour chaque polygone le nombre d'échos mesurés pour une strate de hauteur donnée. Le tableau 6.3 illustre un cas fictif pour lequel six strates de hauteur ont été définies (S_1 à S_6).

cellule/strate	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	Indicateur.
0	187						1
1	34		6	38	18	2	3
2		10	128	137	153		3
...

Tableau 6.3. Extrait d'un tableau résultant de la requête SQL paramétrée pour 6 strates (seuil fixé à 10%).

La densité des échos pour chacune des strates est ensuite calculée. Les strates S_i ayant une valeur inférieure au seuil fixé sont considérées comme non occupées ($S_i < \text{seuil} = S_p$). Les autres sont considérées comme significativement occupées ($S_i > \text{seuil} = S_p$). En faisant la somme de ces dernières, on définit un indicateur de structure:

$$\text{Indicateur} = \sum_{S_i > S_p} s_i \quad (6.2)$$

Plus sa valeur est faible et plus la structure est simple. En revanche, une valeur d'indice élevée signifie qu'il n'y a que peu ou pas de strates de hauteur vide et donc que la distribution des échos est relativement uniforme sur toute la hauteur du couvert. On a de forte chance d'être en présence d'une structure complexe ou étagée. Cet indice propose une information agrégée et ne permet pas, sous cette forme, de faire la distinction entre un peuplement ayant les strates inférieures remplies, d'un peuplement qui aurait les

strates supérieures remplies. Une manière de prendre en compte ces différences consiste à tracer un graphique qui identifie des strates significativement pleines pour chaque polygone (figure 6.5 - graphique de gauche). Une seconde manière de faire consiste à calculer directement un histogramme du nombre de points bruts par strate de hauteur (figure 6.5 - graphique de droite). Ce graphique offre une appréciation visuelle de la distribution des échos à travers le couvert. Ces informations peuvent être directement dérivées des tables de requêtes créées durant la calcul de l'indice de structure.

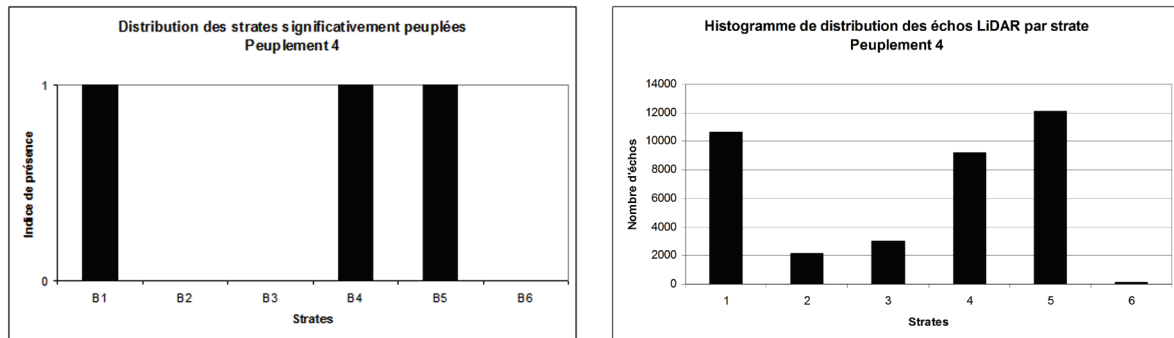


Figure 6.5. Analyse par histogrammes. À gauche, un graphique illustrant si une strate de hauteur donnée est significativement remplie par des échos LiDAR (avec une densité d'échos supérieure à un seuil fixé en [%]). À droite, un histogramme représentant le nombre d'échos par strate de hauteur.

Afin d'interpréter judicieusement cet indicateur, une analyse a déterminé l'influence du choix du nombre de séparations verticales, ainsi que de la densité minimale des échos à prendre en compte pour qu'une strate de hauteur soit considérée comme significativement occupée.

INFLUENCE DU SEUIL DE DENSITÉ

Le seuil de densité est un paramètre à adapter en fonction du nombre de strates que l'on souhaite prendre en compte dans l'analyse. D'une manière générale, plus les tranches de hauteur sont nombreuses, plus le seuil devra être bas. A nombre de strates égales, on observe qu'une augmentation du seuil aura pour effet de mieux faire ressortir les structures marginales (trouées ou peuplements très complexes). En revanche, à l'échelle d'une division, on risque de perdre une information plus générale, mais importante pour la description des peuplements en place. Dans l'exemple illustré par la figure 6.6, on observe très peu de changement lorsque l'on passe de 5 à 10%, alors qu'à 20% de seuil de densité, les peuplements les plus complexes sont mieux différenciés. Conséquemment, la superficie des peuplements plus «simples» augmente.

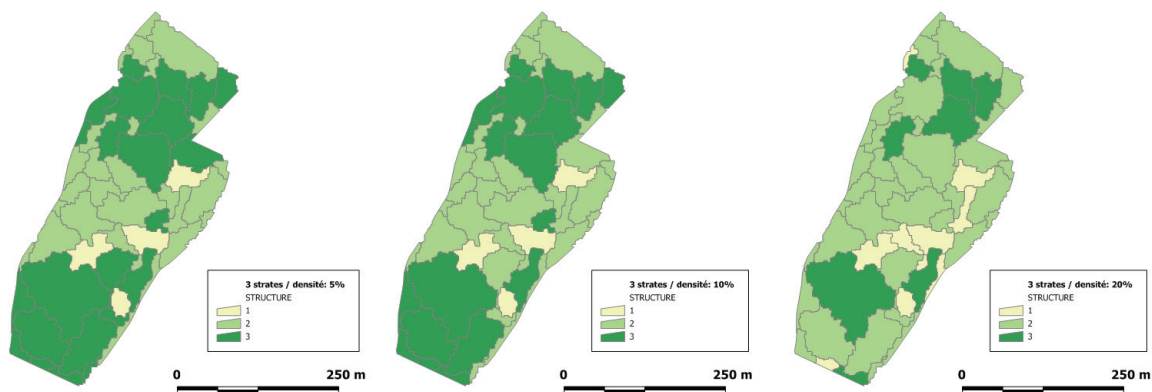


Figure 6.6. Variation des seuils de densité de points bruts à prendre en compte pour qu'une strate de hauteur soit considérée comme significativement remplie: à gauche: 5%; au centre: 10%; à droite: 20%. Les trois cartographies reposent sur un découpage en trois strates.

INFLUENCE DU NOMBRE DE SÉPARATIONS VERTICALES

En augmentant le découpage vertical du nuage de points bruts, on augmente la résolution de l'analyse. Il faut garder à l'esprit qu'en peuplement dense, ainsi qu'en période de végétation, la majorité des échos se font sur le toit de la canopée. Proportionnellement, les échos intermédiaires sont moindres. Ceci est d'autant plus vrai lorsque l'on traite des données ayant une densité relativement faible (2 à 4 [pts/m²]) ou que le système LiDAR utilisé ne permette l'enregistrement que d'un seul retour par impulsion. Néanmoins, la figure 6.7 montre que pour les données LiDAR traitées dans cette étude, l'augmentation jusqu'à cinq strates semble faciliter la mise en évidence des variations de structures du couvert. L'option finalement retenue pour le paramétrage initial de l'indicateur est un découpage en cinq strates avec une densité seuil de 5 à 15%.

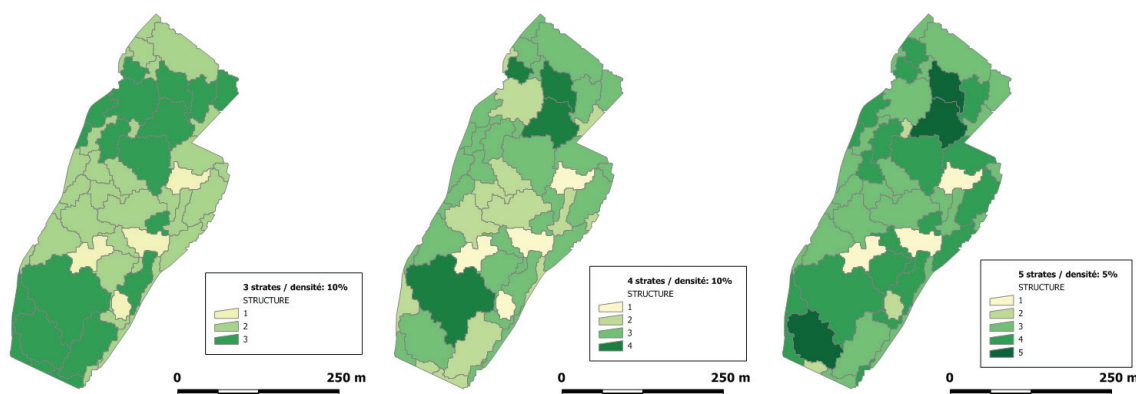


Figure 6.7. Analyse du nombre de strates à prendre en compte pour le calcul de l'indicateur. Le seuil de densité à considérer est ajusté pour chaque cas.

6.4.3. L'ÉCART-TYPE DE LA DISTRIBUTION VERTICALE DES POINTS BRUTS

L'écart-type des hauteurs renseigne sur l'homogénéité de la distribution verticale des points bruts à travers le couvert (figure 6.8). De la même manière que l'analyse basée sur le découpage vertical en strates de hauteur, l'analyse de l'écart-type permet de délimiter certaines structures forestières caractéristiques: futaies étagées, trouées, plantations. Cette information simple apporte donc des renseignements objectifs pour aider ou valider la discrimination entre différents types de peuplements. Il est néanmoins conseillé de traiter ce résultat en parallèle avec le taux de pénétration pour s'assurer de la bonne homogénéité spatiale des données sources. Un écart-type très petit couplé à un taux de pénétration élevé des impulsions signifie qu'une structure forestière est simple. En revanche, lorsque l'écart-type et le taux de pénétration des impulsions sont tous les deux faibles, il se peut que le peuplement soit en réalité complexe (avec plusieurs strates), mais que la canopée soit trop dense pour laisser décrire le sous-bois.

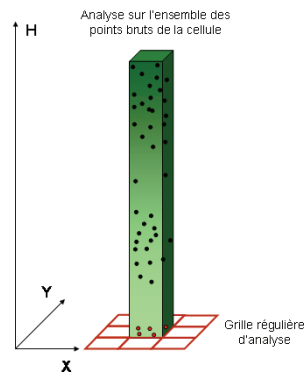


Figure 6.8. Indice de structure verticale: analyse de l'écart-type des hauteurs de points bruts sur la base d'une grille régulière d'analyse.

6.4.4. CARTOGRAPHIE THÉMATIQUE DES PEUPEMENTS

La réalisation d'une cartographie automatique des types de peuplements est essentiellement un outil exploratoire. Deux approches similaires sont proposées: la première repose sur une discrimination des peuplements par l'étude des percentiles (type I), alors que la seconde considère la médiane et l'écart-type (type II). Pour la cartographie de type I, les seuils marquant la séparation entre deux peuplements sont fixés à l'avance. C'est en faisant varier la valeur du percentile discriminant que l'on adapte la classification des polygones. Cette approche a été conçue pour permettre le calibrage de la méthodologie entre plusieurs divisions de composition très différentes ou lorsque plusieurs jeux de données LiDAR sont utilisés pour un même site. La cartographie de type II fonctionne de manière inverse. Alors que le percentile discriminant est fixé à l'avance, les seuils marquant la différenciation entre les peuplements sont ajustés séparément. Cette seconde solution a été privilégiée pour la suite de l'étude.

Les types de peuplements recherchés se basent sur la typologie neuchâteloise. Deux ajustement ont cependant été faits. Tout d'abord, les forêts parcourues par le bétail ne présentent pas de caractéristiques spatiales assez marquées pour être discernées à l'aide des modèles altimétriques LiDAR. Cette classe a donc été éliminée. Ensuite, la distinction entre les prés et recrûs libérés n'est pas assez significative. Une classe commune a donc été créée. La typologie corrigée des peuplements comporte donc sept classes (tableau 6.4).

		Description
Jeune forêt	1	prés, clairières / trouées en forêt / recrû libéré (= arbres jusqu'à 1.5 [m] de hauteur)
	2	fourré (= arbres entre 1.5 et 5 [m] de hauteur)
	3	perchis (= arbres > 5 [m] de hauteur, jusqu'à 20 [cm] dhp ^a)
Futaies	4	jeune futaie (de 20 jusqu'à 35 [cm] dhp)
	5	futaie moyenne (de 35 jusqu'à 50 [cm] dhp)
	6	vieille futaie (plus de 50 [cm] dhp)
	7	peuplement étagés (sens large)

Tableau 6.4. Légende des peuplements considérés pour la classification automatique.

a. dhp = diamètre à hauteur de poitrine (hauteur sol = 1.30 [m])

Les peuplements 1 à 6 sont délimités sur la base d'un indicateur statistique (la médiane). Les peuplements étagés sont discriminés en prenant en compte la valeur de l'écart-type de la distribution verticale des points bruts. Au-delà d'une certaine valeur seuil, les futaies sont classées comme étagées. Cette fonction n'a pas pour objectif de produire une carte définitive des peuplements, mais plutôt d'apporter une première analyse utile et objective de la structure forestière en place.

SIGNATURE DE PEUPEMENTS PAR ÉCHANTILLONNAGE

Une étude préliminaire a été réalisée afin d'analyser la distribution des points bruts à l'intérieur de peuplements de références judicieusement choisis et visités sur le terrain avec le forestier. L'objectif est d'identifier les statistiques susceptibles de permettre une discrimination automatique entre les différents structures de peuplement.

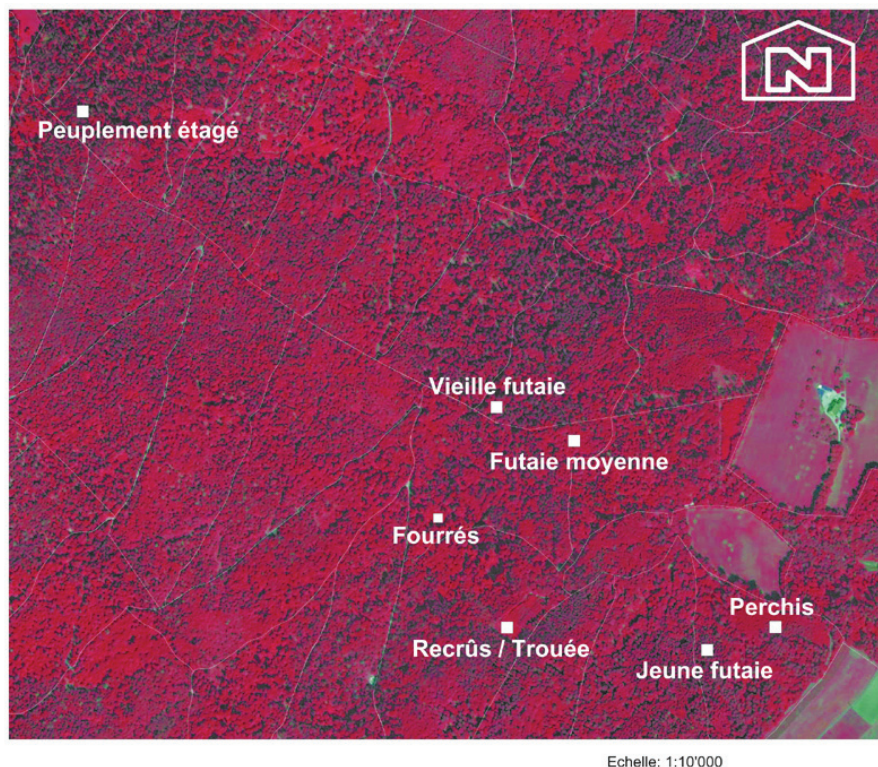
Echantillons de peuplements

Figure 6.9. Localisation des sept échantillons de points bruts (25*25 [m²]) sélectionnés pour l'analyse des structures de peuplements. L'étude porte sur la forêt communale de Bevaix.
Source de données: orthophoto; © SITN (www.ne.ch/sitn).

Un échantillon d'arbres représentatifs a été mesuré au tachéomètre pour les quatre types de peuplements les plus âgés et dont la taille moyenne des individus est supérieure à 5 [m]: perchis, jeune futaie, futaie moyenne et vieille futaie. Les résultats détaillés se trouvent dans l'annexe B. Un échantillon de points bruts a ensuite été extrait sur chacun des sept sites afin d'en analyser la distribution verticale. L'altitude du terrain a été ajoutée à chaque point brut du MNS par une fonction de recouvrement (overlay). On a ainsi pu calculer une hauteur pour chaque point brut. C'est à partir de cet attribut que sont ensuite calculées les statistiques: le nombre de points bruts, la hauteur moyenne, la médiane, l'écart-type ainsi que la valeur des percentiles 75 et 99. Les tableaux 6.5 à 6.11 résument les informations pour chaque peuplement. La ligne «brut» présente les statistiques réalisées sur la totalité des points bruts; la ligne «seuil» ne considère que les échos ayant une hauteur supérieure ou égale à 30 [cm].

Le nombre de points bruts au sol peut avoir une importance sur la valeur des différentes statistiques, alors qu'il ne révèle pas directement une information sur la distribution verticale de la végétation. Une option consiste à éliminer les points bruts ayant une hauteur inférieure à 30 [cm]. On garde ainsi une distribution des mesures suffisante pour les jeunes peuplements tout en améliorant la discrimination entre les peuplements plus âgés. Sur la figure 6.12, on observe que la séparation entre les peuplements âgés est facilitée lorsque les points au sol sont éliminés.


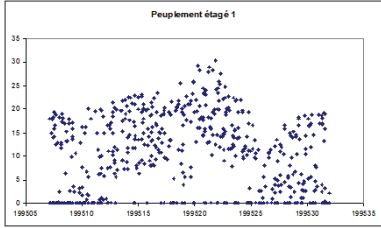
Peuplement étagé											
Mesures sur le terrain					Analyse de la distribution des points bruts LiDAR						
	Nb	h_{moy}	h_{med}	σ	Nb	σ	h_{moy}	h_{med}	h_{max}	Q75	Q99
brut	-	-	-	-	571	8.16	10.58	11.5	30.44	17.78	28.21
seuil	-	-	-	-	435	6.46	13.87	14.36	30.44	19.01	29.02
											

Tableau 6.5. Statistiques collectées pour un peuplement étagé de référence.


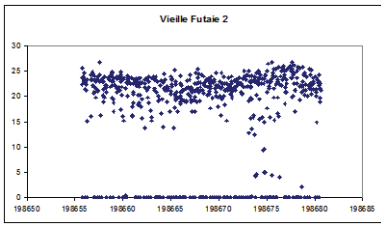
Vieille futaie											
Mesures sur le terrain					Analyse de la distribution des points bruts LiDAR						
	Nb	h_{moy}	h_{med}	σ	Nb	σ	h_{moy}	h_{med}	h_{max}	Q75	Q99
brut	8	31.80	31.04	3.96	647	9.07	17.17	21.4	26.78	23.11	26.03
seuil	-	-	-	-	519	3.47	21.4	22.15	26.78	23.37	26.41
											

Tableau 6.6. Statistiques collectées pour une vieille futaie de référence.


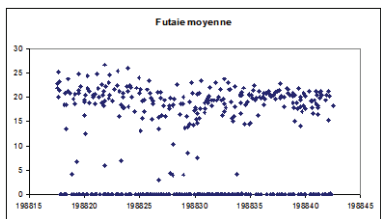
Futaie moyenne											
Mesures sur le terrain					Analyse de la distribution des points bruts LiDAR						
	Nb	h_{moy}	h_{med}	σ	Nb	σ	h_{moy}	h_{med}	h_{max}	Q75	Q99
brut	6	20.74	21.18	2.83	430	9.75	11.29	16.29	26.67	20.24	25.32
seuil	-	-	-	-	256	3.82	18.94	19.77	26.67	21.04	26.04
											

Tableau 6.7. Statistiques collectées pour une moyenne futaie de référence.


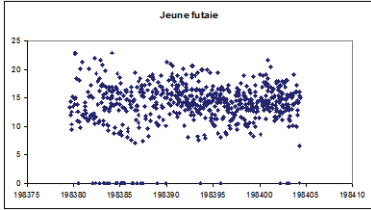
Jeune futaie											
Mesures sur le terrain					Analyse de la distribution des points bruts LiDAR						
	Nb	h_{moy}	h_{med}	σ	Nb	σ	h_{moy}	h_{med}	h_{max}	Q75	Q99
brut	4	18.08	18.12	1.80	661	4.17	13.79	14.32	22.88	16.16	21.59
seuil	-	-	-	-	628	2.79	14.51	14.53	22.88	16.34	21.74
											

Tableau 6.8. Statistiques collectées pour une jeune futaie de référence.


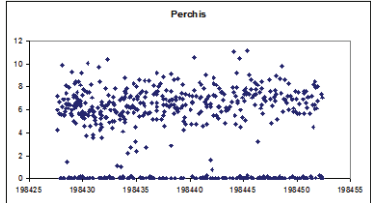
Perchis											
Mesures sur le terrain					Analyse de la distribution des points bruts LiDAR						
	Nb	h_{moy}	h_{med}	σ	Nb	σ	h_{moy}	h_{med}	h_{max}	Q75	Q99
brut	12	11.88	10.59	3.00	573	3.27	4.51	5.81	11.19	7.06	10.39
seuil	-	-	-	-	393	1.49	6.55	6.56	11.19	7.43	10.60
											

Tableau 6.9. Statistiques collectées pour un peuplement de perchis de référence.

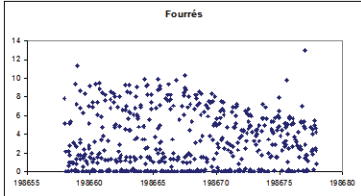
Fourrés											
Mesures sur le terrain					Analyse de la distribution des points bruts LiDAR						
	Nb	h_{moy}	h_{med}	σ	Nb	σ	h_{moy}	h_{med}	h_{max}	Q75	Q99
brut	-	-	-	-	568	2.99	3.20	2.37	13.03	5.65	9.86
seuil	-	-	-	-	403	2.63	4.48	4.47	13.03	6.69	10.24
											

Tableau 6.10. Statistiques collectées pour un fourré de référence.

Recrûs / Trouées											
Mesures sur le terrain					Analyse de la distribution des points bruts LiDAR						
	Nb	h_{moy}	h_{med}	σ	Nb	σ	h_{moy}	h_{med}	h_{max}	Q75	Q99
brut	-	-	-	-	957	0.10	0.04	0.01	1.33	0.05	0.49
seuil	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

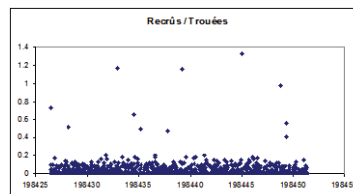


Tableau 6.11. Statistiques collectées pour une trouée de référence.

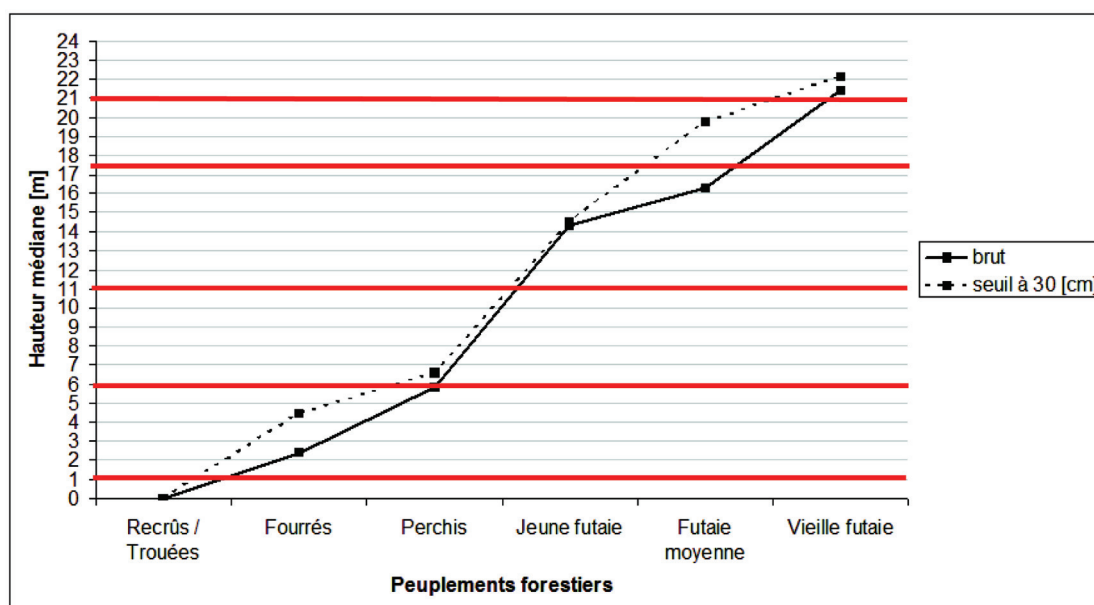


Tableau 6.12. Délimitation des seuils (traits horizontaux épais) pour la discrimination automatique des peuplements forestiers sur la base de la médiane (Annexe D, ASPL - Peuplement Type II). Les valeurs se réfèrent à l'étude des peuplements détaillée dans les tableaux 6.4 à 6.8 (-: échantillon complet; - - -: échantillon de points bruts avec élimination des mesures ayant une hauteur inférieure à 30 [cm]).

La détection des peuplements étagés par la valeur de l'écart-type de la distribution des hauteurs est une procédure délicate. La qualité de la modélisation sur toute la hauteur du couvert dépend largement du taux de pénétration. Pour cette étude, un écart-type (seuil moyen) de 7 [m] a été choisi sur la base de l'étude réalisée sur un peuplement de référence (tableau 6.5). Le tableau 6.13 donne les valeurs de seuils retenus dans cette étude pour la cartographie automatique des peuplements. La discrimination est réalisée selon deux statistiques: la médiane et l'écart-type.

Statistique	Trouées / Recrûs	Fourrés	Perchis	Jeunes futaies	Futaies moyennes	Vieilles futaies	Peuplements étagés
médiane	< 1 [m]	> 1 [m] < 6 [m]	> 6 [m] < 11 [m]	> 11 [m] < 17.5 [m]	> 17.5 [m] < 21 [m]	> 21 [m]	-
écart-type	-	-	-	< 7 [m]	< 7 [m]	< 7 [m]	> 7 [m]

Tableau 6.13. Sélection des seuils sur la médiane et l'écart-type implémentés dans l'application ASPL pour la cartographie automatique des peuplements (type II).

6.5. EVALUATION DES MÉTHODES SUR LES SITES D'ÉTUDES

Les quatre indicateurs ont été calculés sur la base des délimitations de peuplements issues de la segmentation du MNH (décrite dans le chapitre 5). Les résultats sont présentés en deux temps. Tout d'abord, les trois cartographies relatives à la description statistique de la distribution verticale des échos sont commentées :

- Le taux de pénétration des impulsions.
- La structure verticale estimée par un découpage discret des hauteurs.
- L'écart-type de la distribution verticale des échos.

Ensuite, la cartographie thématique des peuplements reposant sur l'étude de la médiane et de l'écart-type est comparée aux données fournies par le forestier.

6.5.1. STRUCTURE VERTICALE DES ÉCHOS

APPLICATION SUR LA DIVISION 45

Etant donné que les indicateurs portent sur l'analyse de la distribution verticale des échos LiDAR, on observe une forte corrélation entre les trois cartographies (figure 6.10). Elles se distinguent néanmoins sur certains points. Le taux de pénétration permet par exemple de révéler rapidement la présence d'ouvertures dans les peuplements (taux de pénétration maximal). Cet indicateur permet encore de mettre en évidence les peuplements ayant une canopée très dense, ce qui peut se traduire par une modélisation approximative du sous-bois ou du terrain. La figure 6.11 met en relation la valeur du taux de pénétration des impulsions LiDAR avec la distribution des points bruts du MNT.



Figure 6.10. Cartographies du taux de pénétration des impulsions (à gauche), de la structure verticale estimée par un découpage discret des hauteurs (au centre) et de l'écart-type de la distribution verticale des échos (à droite).

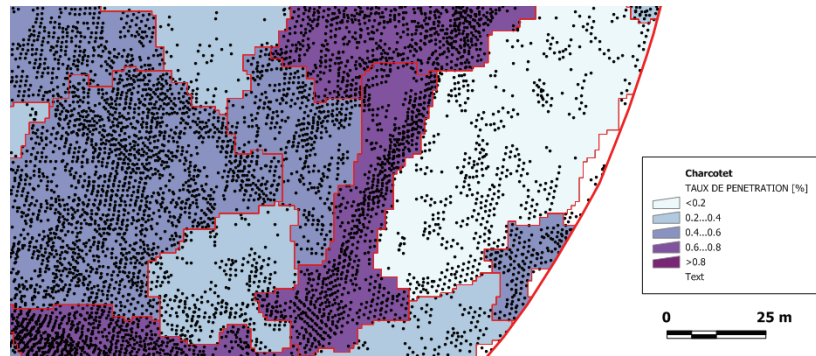


Figure 6.11. Localisation des points bruts LiDAR du MNT (points noirs) avec pour fond de plan la cartographie du taux de pénétration des impulsions.

Les deux indicateurs suivants informent de manière un peu plus détaillée sur la distribution des échos entre le toit de la canopée et le sol. Le découpage du nuage de points bruts en strates de hauteur, contrairement à la cartographie de l'écart-type, permet de jouer sur deux paramètres (le nombre de strates et la densité seuil). Il est ainsi possible d'adapter l'analyse au type de peuplement ou de données. La possibilité de générer facilement des histogrammes de la distribution des hauteurs de points bruts sur la base des tables intermédiaires de requête permet d'exploiter pleinement la 3ème dimension offerte par la technologie LiDAR. Même si la cartographie de l'écart-type offre un moyen simple de sortir une information objective sur la structure verticale des peuplements, l'information estimée par un découpage discret des hauteurs est une solution à privilégier.

En complétant l'analyse par le calcul d'indicateurs sur la base d'un maillage régulier, on est en mesure d'apporter une nouvelle information objective pour valider l'emplacement d'une structure particulière ou de s'assurer de la bonne légitimité de la délimitation automatique des peuplements.

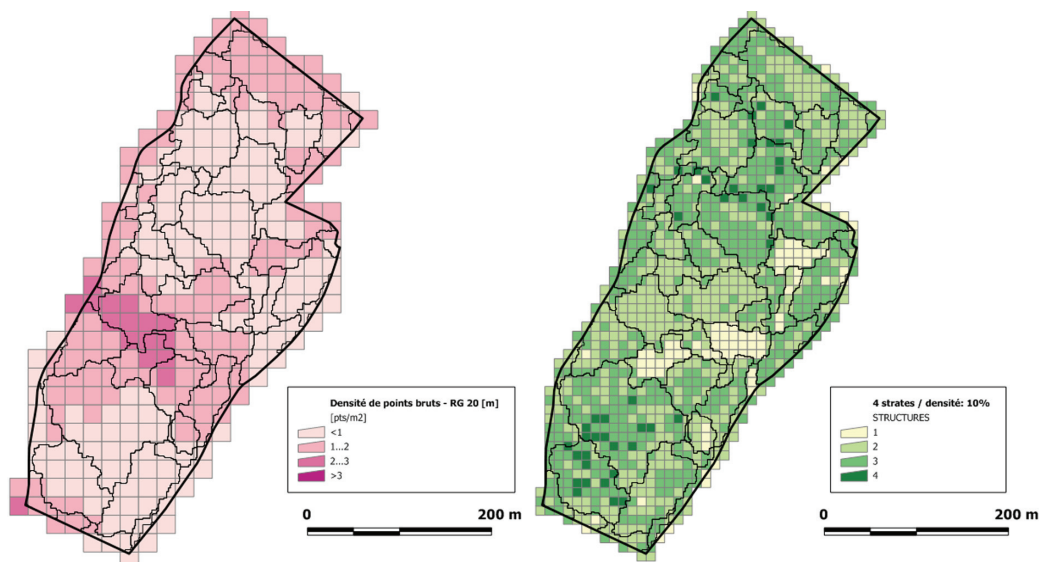


Figure 6.12. Validation des indicateurs sur la base de cartographies basées sur un maillage régulier. A gauche, une carte de densité des points bruts LiDAR avec en surimpression la délimitation automatique des peuplements. A droite, une cartographie des structures forestières (4 strates / densité seuil de 10%) avec en surimpression la délimitation automatique des peuplements.

APPLICATION SUR LA DIVISION 24

La même démarche que celle réalisée sur la division 45 a été reconduite sur la division 24 de la forêt communale de Bevaix. Ce nouveau site se compose en très grande majorité de futaies relativement homogènes. Le critère de structure prend donc toute son importance.

L'homogénéité du couvert forestier se révèle clairement sur la cartographie du taux de pénétration. La densité du toit de la canopée, propre aux futaies, limite de manière significative la proportion des échos LiDAR au sol. Les deux indicateurs suivants (discrétisation des hauteurs LiDAR et écart-type) donnent des résultats relativement divergents. Si les peuplements plus ouverts présentent effectivement des structures simples, il est difficile de se faire une idée précise des peuplements à considérer comme complexes ou étagés. Une analyse détaillée des histogrammes semble nécessaire.

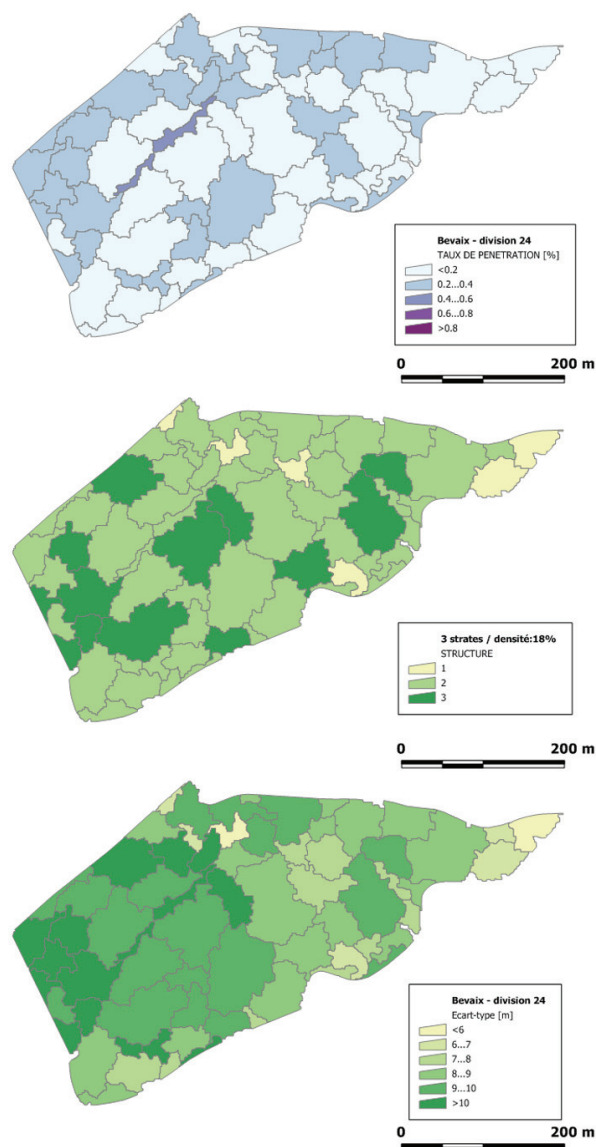


Figure 6.13. Cartographies du taux de pénétration des impulsions laser (en haut), de la structure verticale estimée par un découpage discret des hauteurs (au centre) et de l'écart-type de la distribution verticale des échos (en bas)

6.5.2. CARTOGRAPHIE THÉMATIQUE DES PEUPEMENTS

APPLICATION SUR LA DIVISION 45

La cartographie thématique des peuplements, malgré le fait qu'elle se limite à l'analyse de statistiques simples (médiane et écart-type), offre une première vue d'ensemble intéressante (figure 6.14). Dans cet exemple, on peut noter les points suivants:

- Les secteurs de fourrés sont relativement bien identifiés et cartographiés.
- Des confusions entre les peuplements de perchis et les jeunes futaies peuvent survenir, mais de manière générale, ces deux types de peuplements peuvent être distingués.
- La distinction entre les peuplements plus âgés (vieilles et moyennes futaies) est également assez concluante.
- La plus grande difficulté repose sur la reconnaissance des peuplements étagés. Si la cohérence entre la cartographie des peuplements et la cartographie des structures est bonne, il existe de nombreuses divergences avec les données du relevé forestier.

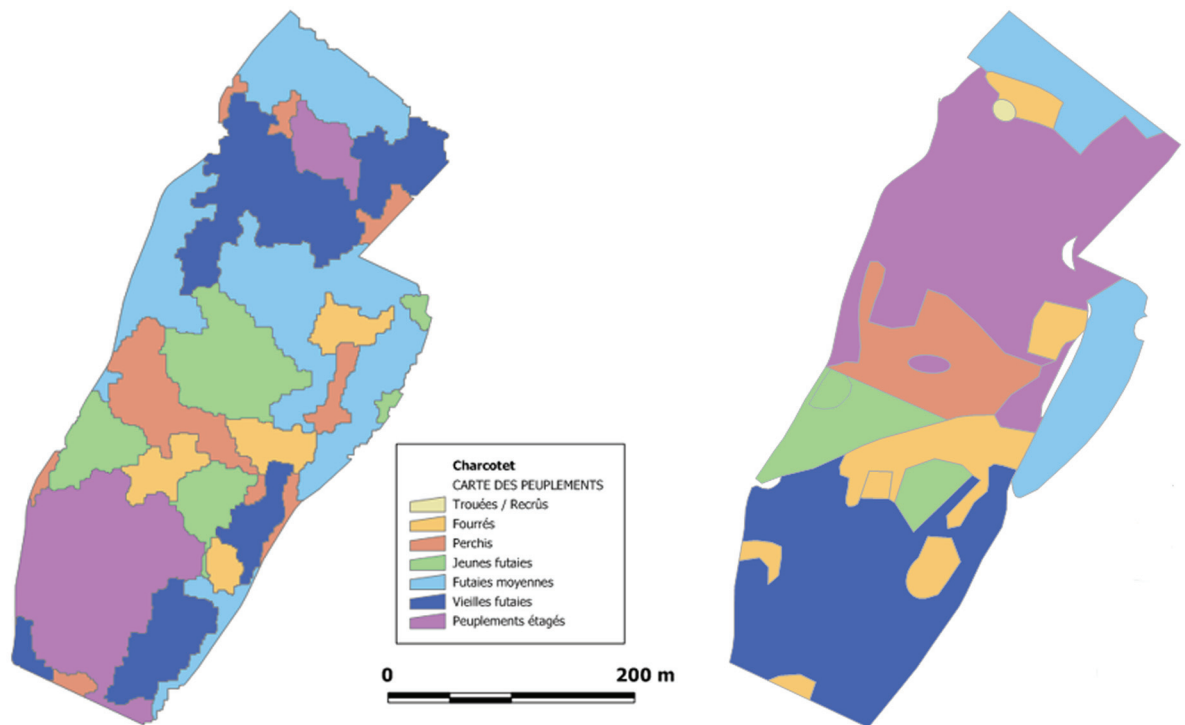


Figure 6.14. Comparaison entre la cartographie automatique des peuplements (à gauche) et la cartographie issue de l'aménagement forestier (à droite).

La comparaison du résultat cartographique avec d'autres sources de données permet de s'assurer encore de la cohérence et de l'objectivité de la méthodologie. La figure 6.15 donne ainsi un aperçu de la délimitation des peuplements, avec pour fond de plan l'orthophoto. La figure 6.16 illustre la comparaison entre la cartographie des peuplements calculée avec les délimitations issues du processus de segmentation du MNH (à gauche) et le même indicateur calculé sur la base d'un maillage régulier de cellules ayant 10 [m] de côté.



Figure 6.15. Délimitation des peuplements avec l'orthophoto 2006 en fond de plan.
Source de données: orthophoto; © SITN (www.ne.ch/sitn).

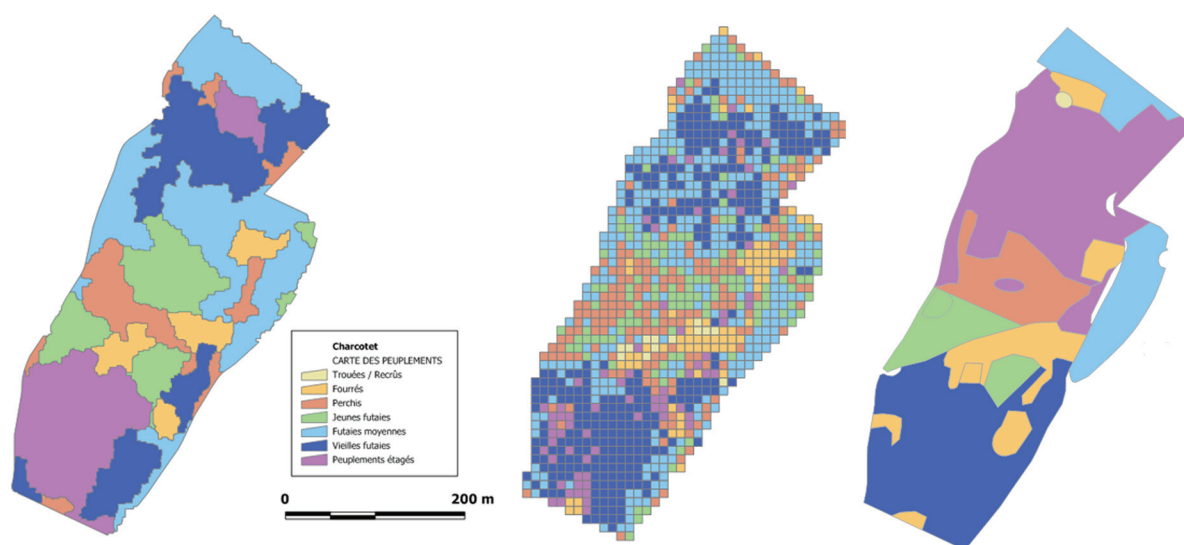


Figure 6.16. Comparaison entre la cartographie des peuplements calculée avec les délimitations issues du processus de segmentation du MNH (à gauche) et le même indicateur calculé sur la base d'un maillage régulier de cellules ayant 10 [m] de côté (au centre). A droite, la cartographie issue de l'aménagement forestier.

APPLICATION SUR LA DIVISION 24

De manière similaire à la division 45, les jeunes peuplements (fourrés, perchis) sont relativement bien délimités (figure 6.17) sur l'analyse de la division 24. Cependant, lorsque la transition entre les jeunes structures et les peuplements plus âgés n'est pas précisément délimitée, la valeur de la médiane est affectée et un peuplement «intermédiaire» est attribué. Plus concrètement, il se peut qu'une zone de transition entre un fourré et une vieille futaie soit finalement reconnue comme étant de la jeune futaie. Pour éviter cela, une correction des délimitations s'impose, avec l'appui de l'orthophoto ou d'une cartographie par grille régulière.

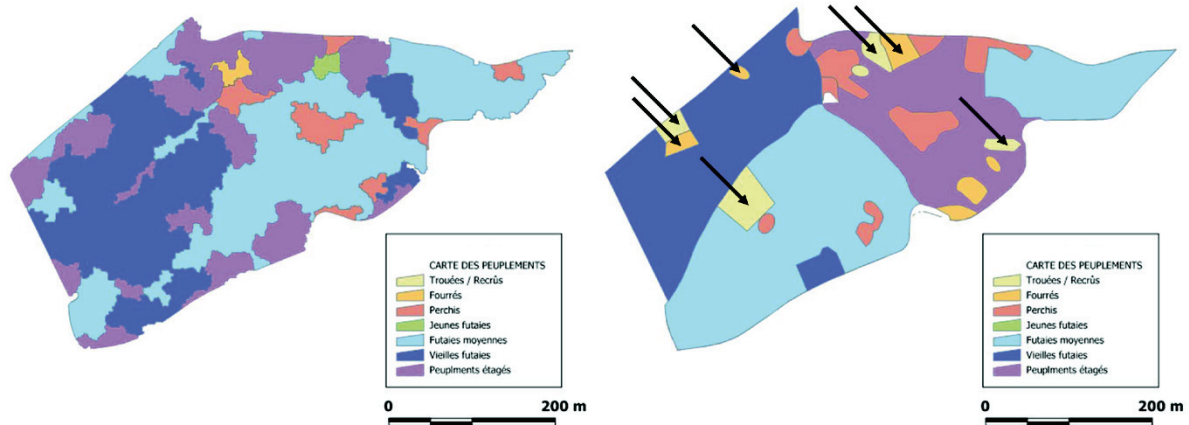


Figure 6.17. Comparaison entre la cartographie thématique des peuplements (à gauche) et la cartographie issue de l'aménagement forestier (à droite). Les secteurs pointés par les flèches correspondent à des rajonissements (libérés) de la strate supérieure après 2002.

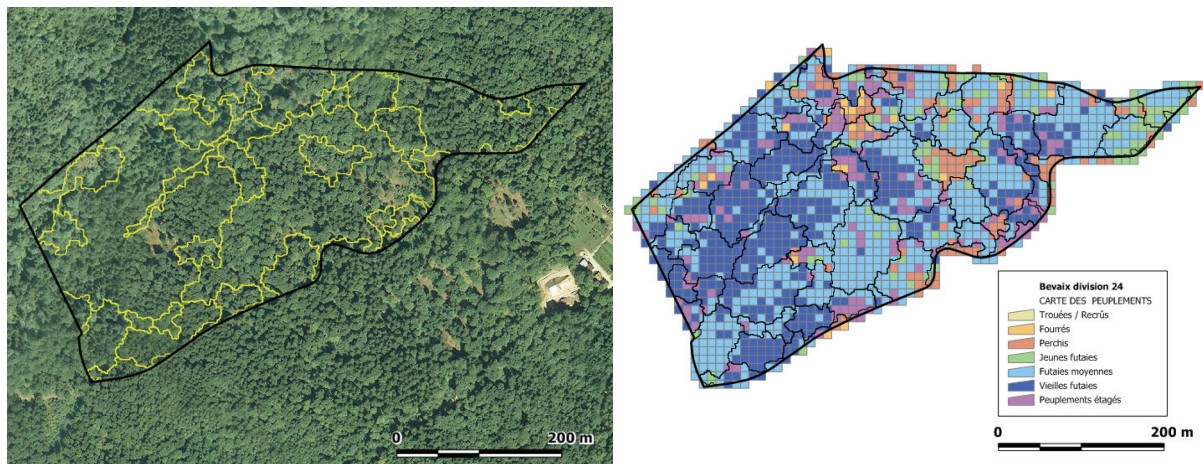


Figure 6.18. A gauche, délimitation des peuplements avec l'orthophoto 2006 en fond de plan. A droite, cartographie des peuplements sur la base d'une grille régulière (résolution de la maille $10 \times 10 \text{ m}^2$).
Source de données: orthophoto; © SITN (www.ne.ch/sitn).

6.6. SYNTHÈSE ET CONCLUSION

Actuellement, l'analyse et la description des structures forestières se limitent ordinairement à une information à deux dimensions dérivée de l'image aérienne ou de levés terrestres (inventaires et descriptions spéciales). La charge de travail est en général importante et repose largement sur les compétences d'un petit nombre de personnes. Bien que le geste sylvicole se pratique localement, au niveau de l'arbre et du peuplement, la gestion forestière intégrée et durable ne peut se passer d'une connaissance globale de l'ensemble du massif forestier en question. Dans ce contexte, les données LiDAR sont particulièrement utiles en offrant une nouvelle représentation de la forêt qui facilite grandement le travail de terrain. Elles dispensent des informations précises et objectives sur la forêt dans toute la gamme des échelles, de la résolution kilométrique à la résolution métrique. Elles apportent une information sur la hauteur et la structure verticale du couvert forestier, ouvrant ainsi la voie à la détection automatique de certains éléments structurels essentiels de l'architecture forestière (clairières, secteurs de jeunes forêts, lisières, etc.).

6.6.1. STRUCTURE VERTICALE DES ÉCHOS

Les indicateurs de structures forestières présentés dans ce chapitre ont pour but de fournir une information synthétique et facilement interprétable par le forestier. Il faut cependant garder présent à l'esprit qu'une bonne connaissance de la qualité du jeu de données LiDAR (nombre d'échos enregistrés pour chaque impulsion, hauteur de vol, etc.), ainsi que des conditions durant l'acquisition (date du vol, météo, état de la végétation) sont essentielles pour la bonne interprétation des résultats. Par exemple, pour une forêt mixte, l'analyse d'un profil à travers le nuage de points bruts présentera des différences significatives en fonction de la date du vol d'acquisition. En pleine période de végétation, le toit de la végétation est certainement moins perméable aux impulsions LiDAR qu'au début du printemps. Les échos intermédiaires sont ainsi moins nombreux. Ce type de considérations est spécialement important lorsque l'on compare deux jeux de données différents. Il faudra en tenir compte lors de l'interprétation des résultats. Le taux de pénétration des impulsions permet d'identifier les irrégularités de densité de la canopée. Cet indicateur est notamment dépendant de la hauteur de vol et de l'angle d'incidence des impulsions. Une possible amélioration de son interprétation consisterait par exemple à tenir compte de ce dernier paramètre pour le calcul du taux de pénétration. Les paramètres relatifs à l'indicateur de structure selon un découpage vertical discret pourront ainsi être adaptés en conséquence.

Si les calculs du taux de pénétration des impulsions LiDAR et de l'écart-type de la hauteur des échos sont immédiats, la structure verticale estimée par un découpage discret des hauteurs nécessite de faire plusieurs expérimentations afin de trouver les paramètres (nombre de strates et densité seuil) les plus satisfaisants. Il est important de noter que cet indicateur est nécessairement influencé par la forme des couronnes. Un couvert fermé de conifères montrera à cet égard un comportement très différent de celui d'un couvert formé de feuillus, pour une même hauteur de dominants. Une connaissance à priori du mélange forestier est donc souhaitable. L'exploitation des histogrammes de la distribution verticale des échos mérite encore d'être approfondie en proposant par exemple une cartographie qui différencie deux structures identiques en nombre de strates significativement pleines, mais dont les distributions verticales de celles-ci diffèrent radicalement. Les figures 6.19 et 6.20 permettent de se faire une idée sur l'apport de telles représentations graphiques en complément à l'orthophoto.

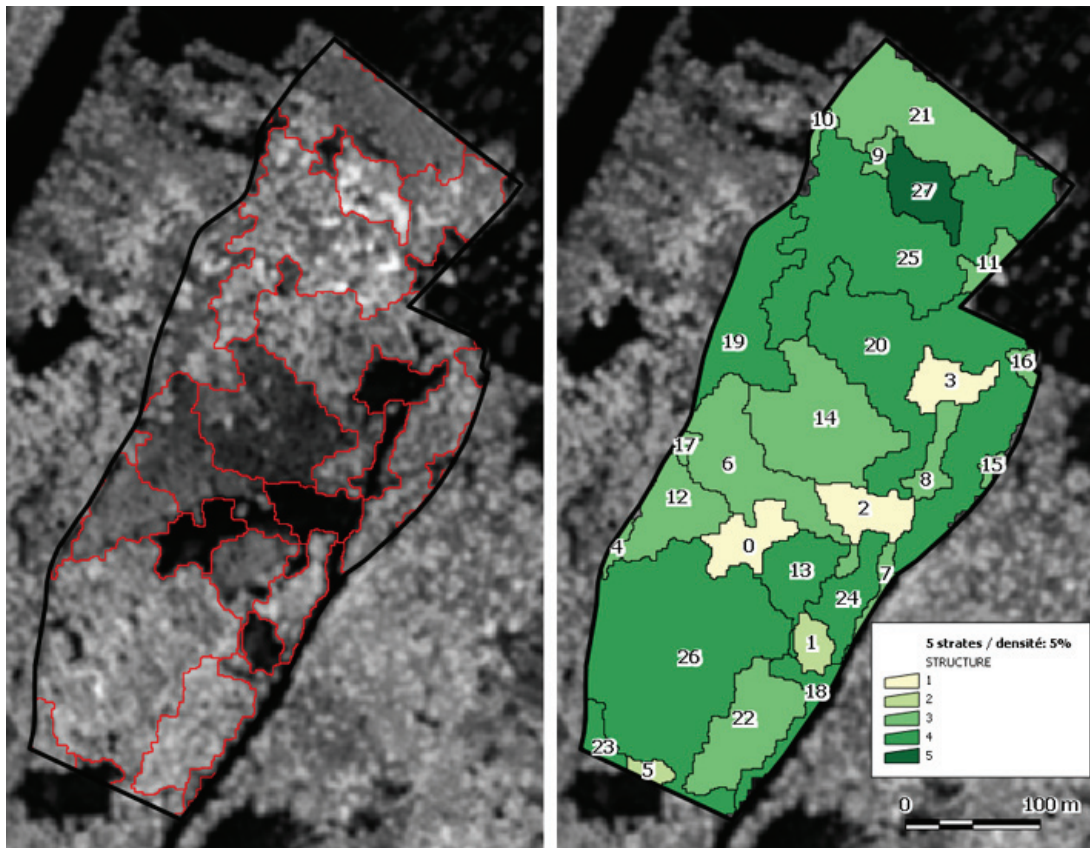


Figure 6.19. A gauche, une représentation des limites de peuplement avec pour fond le MNH raster. A droite, la carte des structures (5 strates / densité 5%) calculée sur la base de la délimitation automatique des peuplements. Le chiffre à l'intérieur de chaque polygone correspond à un identifiant de peuplement attribué automatiquement. Source de données: MNS-MNT-MO; © 2001 Données de la mensuration officielle (www.swisstopo.ch).

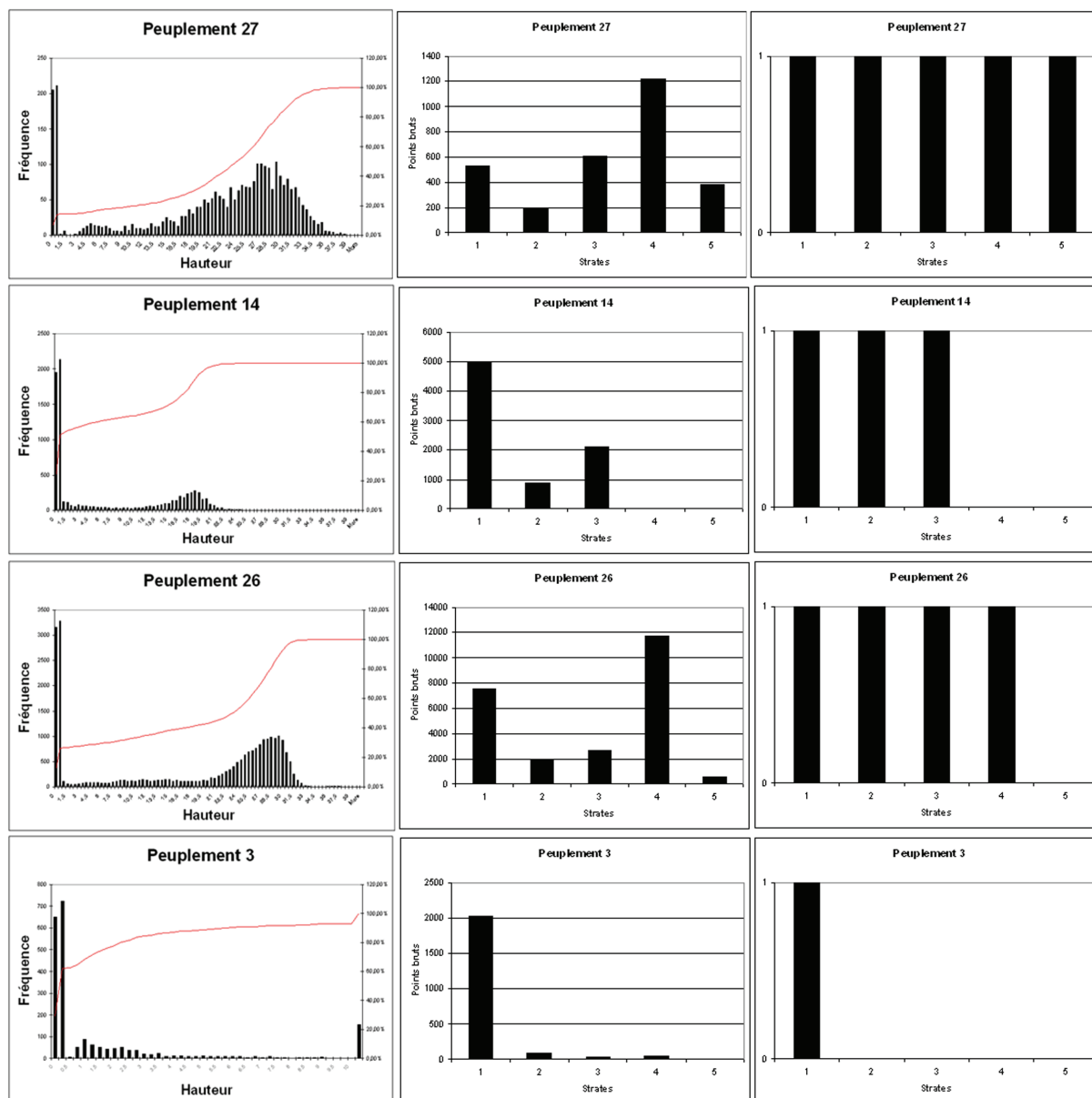


Figure 6.20. Histogrammes de distribution des peuplements 3, 14, 26, 27 (les numéros font référence à la figure 6.19 droite): à gauche, la distribution du nombre de points bruts selon des tranches de hauteur de 50 [cm]; au centre, distribution des points bruts selon un découpage en cinq strates de hauteur; à droite, l'identification des strates marquées comme significativement remplies (indicateur implémenté dans l'application ASPL).

Pratiquement, de telles cartographies statistiques sont en mesure d'apporter aux gestionnaires une information précise sur les variations relatives de structures entre les nombreux peuplements qui composent leur forêt. C'est une manière innovante d'intégrer la dimension verticale du couvert et ainsi ajouter une couche d'information supplémentaire utile à l'aménagiste dont les tâches portent essentiellement sur l'observation et le recensement.

6.6.2. CARTOGRAPHIE THÉMATIQUE DES PEUPEMENTS

Une carte des peuplements issue d'un inventaire intégral et des descriptions spéciales des peuplements repose sur de précieuses connaissances relatives à la dynamique, la richesse spécifique ou encore l'état

sanitaire des forêts. Les premiers résultats de cartographies thématiques des peuplements forestiers, sur la seule connaissance des hauteurs LiDAR, s'avèrent donc très encourageants en regard de la bonne corrélation générale avec les peuplements délimités par la méthode courante. Dans l'état actuel des prospections, ce type d'analyse automatisée se conçoit comme une aide aux travaux de cartographie et de description classiques. C'est une information utile pour lever certains doutes, orienter ou encore faciliter les tâches relatives à l'aménagement forestier. Il faut considérer cette information comme un complément à l'image (couleur ou fausse-couleur). A l'avenir, il serait intéressant d'étudier la possibilité de coupler plusieurs indicateurs en une seule représentation. Deux exemples sont illustrés par les figures 6.21 et 6.22.

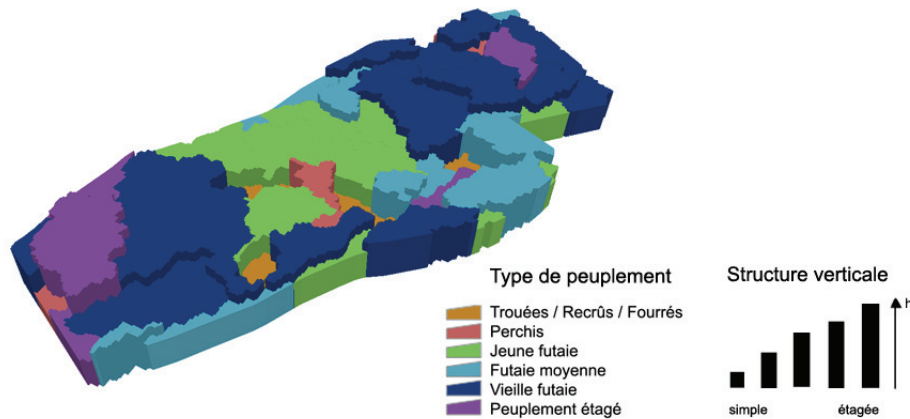


Figure 6.21. Indicateurs combinés: type de peuplement (couleurs) et structure verticale estimée par un découpage discret des hauteurs (extrusion des polygones).

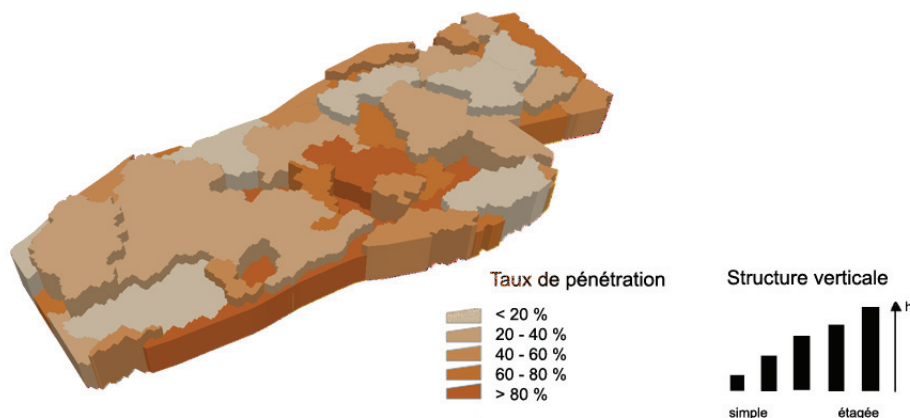


Figure 6.22. Indicateur combiné: taux de pénétration (couleurs) et structure verticale estimée par un découpage discret des hauteurs (extrusion des polygones).

Les données LIDAR ne nous informent pas ou peu sur les essences présentes, sur la dynamique du sous-bois ou encore l'état sanitaire. Même si l'analyse de l'intensité du signal retour de l'impulsion laser devait, un jour, permettre de distinguer les essences feuillues des résineuses, il ne sera jamais possible, spécialement en forêt irrégulière et mélangée, de voir tous les arbres, ni de reconnaître toutes les espèces (certains peuplements mixtes du littoral neuchâtelois comportent, par exemple, plus de 15 espèces ligneuses commerciales différentes par hectare). La combinaison judicieuse des diverses sources d'informations (LiDAR, orthophotos proche infrarouge, levés de terrain, etc.) constitue la solution la plus efficiente en vue d'accéder à une vue d'ensemble avantageuse des peuplements d'un massif.

DÉTERMINATION D'UN TAUX DE BOISEMENT

7.1. PROBLÉMATIQUE

Les limites naturelles, et particulièrement la frontière entre les zones boisées et agricoles, évoluent dans le temps. L'accroissement de la forêt est significatif dans les secteurs d'exploitation abandonnés, essentiellement en zone de montagne et en zone de collines préalpines, où les forêts se sont étendues au détriment des zones agricoles. L'étude décrite dans ce chapitre reprend pour l'essentiel les résultats d'une recherche menée par le LaSIG, sous mandat de swisstopo et en étroite collaboration avec les services cadastraux et des forêts des cantons de Berne et Neuchâtel (Golay et al., 2003). Son principal objectif consiste à évaluer le potentiel de la technologie LiDAR pour le calcul du taux de boisement dans les pâturages boisés. Les pâturages boisés se caractérisent par une structure morcelée présentant des arbres disséminés sous forme de nombreux îlots. Le calcul d'une surface de couvert aussi représentative que possible nécessite donc de délimiter précisément la lisière des secteurs densément boisés, sans pour autant négliger les arbres isolés. Pour cette recherche, l'estimation de la surface projetée des arbres disséminés a été calculée par une régression linéaire entre la hauteur tirée du MNH et le rayon de couronne mesuré sur le terrain.

Afin de mieux comprendre les réels enjeux qui ont motivé une telle recherche, il est important d'exposer en quelques lignes le contexte très helvétique dans lequel s'inscrivent les développements présentés. En Suisse, la progression de la forêt n'a pas fait l'objet d'une mise à jour systématique des plans cadastraux pendant des décennies, en raison surtout des coûts d'une telle opération. Aujourd'hui, l'octroi de paiements directs aux exploitants agricoles requiert une délimitation des surfaces agricoles utiles (SAU). Selon l'Ordonnance fédérale sur la terminologie agricole et la reconnaissance des formes d'exploitation (OTerm, art. 14 et 23, 7 déc. 1998 - 910.91), on entend par surface agricole utile les zones d'exploitation affectées à la production végétale, dont l'exploitant dispose pendant toute l'année¹. Pratiquement, c'est le canton qui doit assurer le contrôle des surfaces annoncées par les exploitants, à l'aide des données de la mensuration officielle (MO). Sur décision du Conseil fédéral en 1999, l'Office fédéral de topographie (swisstopo), mandaté par l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG), a lancé le projet «SAU» visant à actualiser la mensuration officielle. Le but général du projet est de mettre à disposition des offices cantonaux et de l'OFAG, des données actualisées de la MO pour permettre la mise à jour des régions SAU concernées par les paiements directs. Le projet est concrètement divisé en deux phases. La première est à l'origine de la campagne d'acquisition du modèle altimétrique LiDAR sur la grande majorité du terri-

1. Ceci exclut par conséquent les surfaces d'estivage.

toire suisse. Deux nouvelles données ont encore été dérivées du MNT et du MNS: le produit RALF, pour Reconnaissance Automatique des Limites de Forêts, ainsi qu'une orthophoto numérique couleur (SWISSIMAGE). La seconde phase, sous la conduite des services cantonaux du cadastre, traite de la numérisation des plans cadastraux graphiques existants, de la mise à jour des éléments de couverture du sol de la mensuration officielle à l'aide de SWISSIMAGE, tout particulièrement les limites de forêt, et de la détermination des nouvelles surfaces de la couverture du sol.

Dans la pratique, la nature de forêt pour un secteur donné et la détermination de ses limites sont de la compétence des organes forestiers qualifiés (organes forestiers cantonaux). La méthode de travail est libre, pour autant que le résultat satisfasse aux exigences de précision prescrites, avec une limite de la forêt définie avec une précision de 1 à 3 [m]. Une délimitation sur la base de l'orthophoto est généralement suffisante. Elle permet de définir géométriquement toute la zone couverte par les arbres, y compris les branches qui couvrent une bande encore cultivée en bordure de forêt. Cette bande sera alors mesurée sur le terrain, au pas, afin de déterminer la limite de la zone à considérer réellement en zone agricole. Une étude sur le canton du Jura a permis d'évaluer ce temps d'investigation sur le terrain entre 1 et 3 jours/homme pour une commune (République et canton du Jura, 2001). Une photo-interprétation est cependant sujette à différentes contraintes. Il est important de prendre en considération la présence des ombres portées et le déversement d'image lié à la projection conique. Ces deux incidences dépendent, dans une large mesure, de la hauteur de l'objet et de la pente locale du terrain. La structure des lisières aura également son importance pour délimiter précisément une surface agricole utile. La présence d'une ceinture de buissons implique par exemple que la limite forestière au sens de la loi fédérale du 4 octobre 1991 sur les forêts (Loi sur les forêts, LFo) se distinguera significativement de la délimitation de la surface agricole utile au sens de l'ordonnance du 7 décembre 1998 sur la terminologie agricole et la reconnaissance des formes d'exploitation (Ordonnance sur la terminologie agricole, OTerm) (figure 7.1). L'inclinaison des arbres en lisière ou la présence de frondaison vont également avoir une certaine influence pour l'estimation correcte de la lisière.

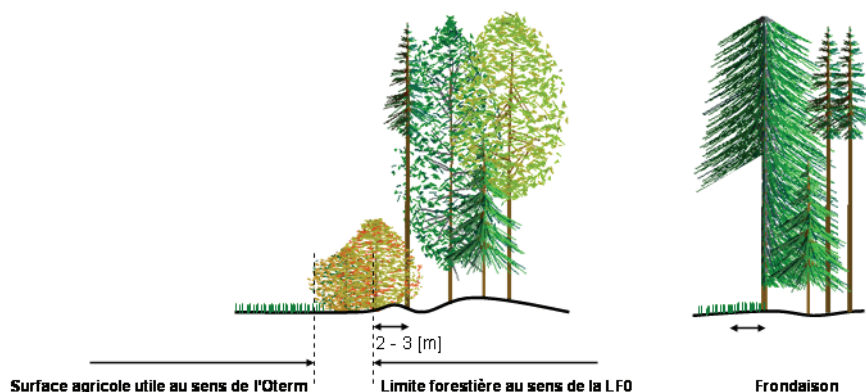


Figure 7.1. Séparation de la limite forestière et de la surface agricole utile en présence d'une forêt avec ceinture de buissons ou d'une frondaison.

Concrètement, l'analyse développée dans ce chapitre se rapporte à la détermination du taux de boisement sur un site pilote du canton de Berne. Ce pâturage boisé à l'avantage de bénéficier de plusieurs valeurs de taux de boisement de référence. Tout d'abord, quatre variantes portant sur des méthodologies traditionnelles (sans l'apport des modèles altimétriques LiDAR) ont été expérimentées sur le site par une équipe du service forestier du canton de Berne (ingénieur d'arrondissement et stagiaire). Ensuite, le résultat du taux de boisement calculé par le logiciel CLAPA-Dendros fait office d'une seconde référence. Les détails méthodologiques de ces différentes approches sont brièvement exposés dans la partie du chapitre plus spécifiquement dédiée au matériel de l'étude.

7.2. ETAT DE L'ART DANS LE DOMAINE DU LiDAR

Si aucune recherche consacrée spécifiquement à l'estimation du taux de boisement par la technologie LiDAR n'a été publiée, il existe quelques études portées sur la délimitation des surfaces boisées. Tout d'abord, dans le cadre du projet SAU, le produit RALF est proposé en complément à une orthophoto couleur (SWISSIMAGE) et aux modèles altimétriques LiDAR (MNT-MO et MNS). Il s'agit d'une reconnaissance automatique des limites de forêt sous forme vectorielle avec une précision planimétrique moyenne (écart-type) de ± 2 [m] dans les régions en-dessous de 2000 [m] (Deillon, 2000). Ces limites de forêt doivent être considérées comme une information complémentaire qui facilite le travail de photo-interprétation. La délimitation automatique d'une lisière par seuillage du MNH a notamment pour avantage de ne pas être perturbée par l'ombre portée des arbres. Les surfaces forestières ne font l'objet d'une reconnaissance automatique que si elles répondent à trois critères:

- leurs surfaces doivent être d'au moins 500 [m²];
- les arbres doivent avoir plus de 3 [m] de haut;
- la largeur de la forêt doit être d'au moins 10 [m].

Dans la même logique, une étude a été menée à l'école polytechnique de Zürich (ETHZ) sur la détection des limites de forêt en utilisant le modèle LiDAR de la Confédération (Brunner, 2006). La technique utilisée repose sur une classification du MNH en mode raster.

Si la littérature est un peu maigre en ce qui concerne l'identification automatique des lisières, les travaux réalisés pour estimer les surfaces projetées des couronnes individuelles sont nettement plus abondants (Gougeon, 1995b; Naesset & Okland, 2002; Weinacker et al., 2004; Popescu, 2002; Garcia, 2007). Pour les besoins de plusieurs études, les diamètres de couronne ont été prédits sur la base des hauteurs d'arbre dérivées par LiDAR. Dans leur modèle de régression, Pitkänen et al. (2004) prédisent un diamètre de couronne maximal (cw) par la fonction: $cw = 1.20 + 0.16 * h$ (h = hauteur de l'arbre dérivée par la technologie LiDAR). Kini et Popescu (2004) ont également prédit le diamètre des couronnes sur la base des hauteurs LiDAR en utilisant une régression linéaire avec un modèle quadratique. Le site d'inventaire étant composé de 189 feuillus et 235 conifères, trois modèles ont été calculés:

- un modèle propre aux conifères: $cw = 3.09632 + 0.00895 * h^2$ ($R^2 = 0.54$, $S_{xy} = 1.49$)
- un modèle propre aux feuillus: $cw = 3.75105 + 0.17919 * h^2$ ($R^2 = 0.58$, $S_{xy} = 1.20$)
- un modèle combiné: $cw = 2.51503 + 0.00901 * h^2$ ($R^2 = 0.59$, $S_{xy} = 1.45$)

Une autre approche pour extraire le diamètre des couronnes consiste à segmenter le MNH. Hyypä (2000) propose une méthodologie en quatre étapes:

- pré-traitement du MNH par un filtre passe-bas afin d'éviter une surestimation du nombre de couronnes;
- extraction des germes à l'intérieur de chaque segment;
- application d'un algorithme de croissance de région;
- correction des erreurs.

Les MNH peuvent être représentés par une image en tons de gris où chaque pixel représente une altitude. En inversant l'image, les arbres apparaissent comme des bassins hydrographiques et il devient alors possible d'appliquer un algorithme de bassin versant pour délimiter le pourtour des couronnes (Mei & Durrieu, 2004). Leckie et al. (2003) ont encore appliqué un algorithme similaire («valley following») sur une image haute résolution et un MNH LiDAR en parallèle. Si le processus de segmentation donne de meilleurs résultats pour l'image optique en peuplements denses, l'extraction des couronnes avec les données LiDAR devient performante en peuplements moins denses. En comparaison avec des données de

références mesurées sur le terrain, 84% des couronnes ont été correctement identifiées sur des échantillons de peuplements peu ou moyennement denses pour seulement 66% en peuplement dense.

Une autre approche prometteuse consiste à segmenter le nuage de points bruts afin d'extraire pour chaque arbre isolé les mesures LiDAR qui lui sont associées. L'algorithme de Kmeans, même si sa mise en oeuvre est relativement délicate, est une option qui a déjà fait ses preuves (Morsdorf et al., 2003).

Alors que l'information spectrale d'une image couleur est déterminante pour la discrimination des espèces, l'information de hauteur d'un MNH est une plus-value incontestable pour améliorer la description structurale d'un peuplement. Plusieurs études exploitent cette fusion d'information à travers une classification orientée objet pour la délimitation des peuplements et des arbres isolés, de même que pour une analyse plus approfondie de la structure de la végétation (Levick & Rogers, 2006, Lang et al. 2006). Chen et al. (2006) proposent une étude portant sur l'extraction des couronnes à travers un double processus. Une classification permet d'extraire la végétation dans un premier temps. L'extraction des couronnes est ensuite réalisée par une segmentation utilisant un algorithme de détermination des bassins versants. Pour les deux sites d'étude analysés, 88% et 94% des arbres ont été correctement identifiés sur des échantillons de 22 et 197 arbres respectivement.

Pour conclure, citons à nouveau l'étude de Pyysalo & Hyypä (2002) qui porte sur la reconstruction d'un modèle vectoriel des couronnes des arbres par l'analyse du nuage de points bruts. La localisation du tronc, ainsi que la hauteur de l'arbre, qui n'est autre que la différence entre la valeur du point brut le plus élevé et la hauteur du terrain à la base du tronc, ont été estimés. Du moment où les nuages de points bruts propres à chaque couronne sont bien séparés, il est encore possible d'estimer la hauteur de couronne. Celle-ci est calculée en faisant la différence entre le point brut le plus haut et la limite inférieure de la couronne, déterminée sur la base d'une analyse de l'histogramme des hauteurs. Alors que l'erreur standard mesurée pour les hauteurs est de 1.2 [m] (biais de + 0.29 [m]), l'erreur standard pour la hauteur de couronne est de 4 [m] (biais de -3 [m]). Le biais négatif indique que les échos des branches inférieures n'ont pas été enregistrés lors de l'acquisition LiDAR.

7.3. SITES ET SOURCES DE DONNÉES

7.3.1. NOTRE SITE D'ÉTUDE

Le pâturage boisé traité dans ce chapitre est situé dans la région de Mont-Tramelan et s'étend sur une superficie de 32.32 [ha] (parcelle 14). Il se trouve à une altitude moyenne de 1055 [m] et se compose en grande majorité d'épicéas. Sa structure horizontale hétérogène en fait un bon candidat pour valider l'approche développée dans cette étude. On y trouve des arbres isolés, par paires, des haies ou encore des surfaces plus ou moins grandes de forêt dense.

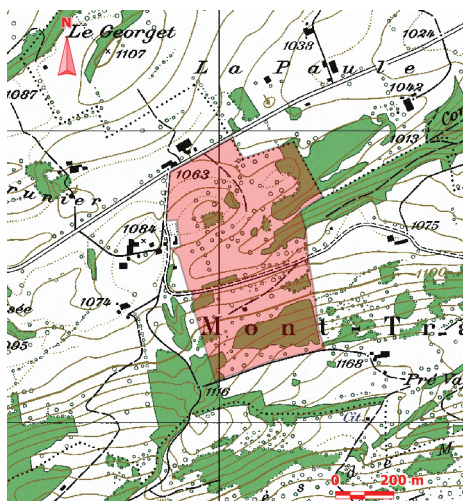


Figure 7.2. Le pâturage boisé de la région de Mont-Tramelan (canton de Berne).
CP25 © 2001 swisstopo (www.swisstopo.ch).

Ce pâturage boisé a encore le grand avantage de bénéficier de plusieurs valeurs de taux de boisement établis par des méthodes conventionnelles, ainsi qu'une valeur calculée par le logiciel CLAPA (Barbezat, 2002).

7.3.2. LES TECHNIQUES TRADITIONNELLES

Entre 1991 et 2000, le taux de boisement a été déterminé sur la parcelle 14 suivant quatre méthodes, toutes basées sur l'interprétation d'une photo aérienne (sans analyse en stéréoscopie):

Variante 1: Calque sur photo aérienne (2000)

- Repérer le périmètre de travail.
- Poser un transparent sur la photo aérienne.
- Délimiter directement sur ce transparent les limites des différentes «natures» considérées, soit forêt, terres agricoles, pâturages boisés ou autres. A l'intérieur des pâturages boisés sont délimités les unités correspondant aux catégories de taux de boisement préalablement définies (par exemple: 0-5%, 5-25%, etc.). L'évaluation du taux de boisement est estimée par un expert, sur la base de l'image aérienne.
- Le dessin obtenu sur transparent est ensuite agrandi à l'aide d'une photocopieuse, de manière à faire correspondre approximativement le périmètre à celui d'un plan à l'échelle 1:5000.
- Planimétrer ensuite toutes les unités délimitées (avec grille à points) pour chaque catégorie de taux de boisement.

Variante 2: Report visuel photo et visite sur le terrain (1991)

- Repérer le périmètre de travail.
- Interpréter la photo aérienne et reporter les limites de toutes les natures et unités à délimiter sur un plan à l'échelle 1:5000. L'évaluation du taux de boisement se fait à l'oeil.
- Se rendre sur le terrain pour vérifier les limites définies lors de l'interprétation de la photo aérienne et adapter les limites si nécessaire.

- Planimétrer toutes les unités délimitées.

Variante 3: Report visuel photo (2000)

- Idem que la variante 2, mais sans visite sur le terrain.
- La différence avec la variante 1 est que dans cette dernière, les délimitations sont directement dessinées sur le transparent posé sur la photo, alors que dans la variante 3, l'interprétation de la photo aérienne est transposée sur un plan à l'échelle 1:5000.

Variante 4: Report visuel photo et visite sur le terrain (2000)

- Méthode en tout point identique à la variante 2. La différence réside dans le fait que le travail est exécuté par une autre personne. Il y a aussi un grand décalage dans le temps. La variante 2 a été effectuée en 1991, alors que la variante 4 date de 2000. Deux photos aériennes différentes ont été utilisées.

7.3.3. LA MÉTHODE CLAPA

Le méthode CLAPA (Classification Automatisée de Photos Aériennes) propose une approche basée sur une classification d'images numériques (noir et blanc, couleur et proche infrarouge) à différentes échelles. Elle permet la reconnaissance des arbres isolés, en groupe et de la forêt dense. Les trois classes de boisé sont représentées par des couleurs distinctives afin de juger rapidement de la pertinence des résultats et ainsi relancer l'analyse avec d'autres paramètres si nécessaire. Outre cette approche itérative, CLAPA permet de corriger manuellement certaines erreurs (ajout ou suppression). Les délimitations sont ensuite vectorisées et exportées dans un logiciel SIG pour effectuer un dernier travail de nettoyage manuel des délimitations et pour s'assurer que les polygones soient bien des surfaces fermées. Les données résultantes sont ensuite exploitées dans un logiciel approprié (SIG ou tableur). Les applications du logiciel sont multiples: calcul du taux de boisement, identification des lisières de forêts, estimation de la stabilité des forêts de montagne et analyse du dynamisme forestier à travers des études diachroniques (Barbezat & Jacot, 1998).

Les résultats CLAPA utilisés pour cette étude concernent le site de Mont-Tramelan et reposent sur l'analyse de l'orthophoto numérique couleur (SWISSIMAGE) distribuée par swisstopo. Le vol a eu lieu le 20 juin 1998. Le modèle numérique de terrain DHM25 d'une résolution de 25 [m] complète le jeu de données.

7.3.4. DONNÉES LiDAR ET ORTHOPHOTOS

Le tableau 7.1 résume les données à disposition ainsi que leurs dates d'acquisition pour le site traité.

Site	Données LiDAR ^a		Données photographiques (orthophotos RGB)		
	Système	Date du vol	Caméra	Date du vol	Résolution spatiale
Mont-Tramelan (Parcelle 14)	ALTMS	2001	Leica RC30	1998	50 [cm]

Tableau 7.1 Tableau résumé des données utilisées pour l'étude consacrée à la localisation des sommets.

- a. Les données techniques spécifiques aux systèmes LiDAR, ainsi que les paramètres des missions de vol, sont exposés au chapitre 3 «Source et nature des données LiDAR».

7.4. DÉLIMITATION D'UNE SURFACE DE COUVERT ET CALCUL DU TAUX DE BOISEMENT

Afin de s'adapter à la structure hétérogène des pâturages boisés, la méthodologie de délimitation automatique du couvert repose sur une approche qui combine un seuillage du MNH avec une identification individuelle des arbres par l'algorithme des maxima locaux (décrit au chapitre 4). Alors que la première approche par seuillage est dédiée à l'extraction des massifs densément boisés, la seconde, dite approche individuelle, a pour but de modéliser les individus disséminés. Concrètement, les deux techniques sont lancées successivement sur l'ensemble du pâturage boisé analysé. Les résultats sont finalement combinés en une seule couche informative qui servira au calcul du taux de boisement. La bonne cohérence de la délimitation finale du couvert repose sur une série de traitements qui attribuent à chacune des approches la tâche de délimiter un secteur donné du pâturage et évitent ainsi toute redondance. Le schéma méthodologique détaillé se trouve dans l'annexe E.

7.4.1. APPROCHE PAR SEUILLAGE

Cette approche consiste à reclasser le MNH en deux catégories. Les pixels ayant pour valeur une hauteur se trouvant au-dessus d'un seuil donné (fixé) sont attribués au «boisé», alors que les pixels ayant une valeur de hauteur inférieure appartiennent à la classe «non boisé». On a ainsi créé une image binaire. La valeur du seuil, qui correspond à une réalité géométrique des objets modélisés, a été fixée à 2 [m]. La justification de cette hauteur est empirique et se base sur la pertinence de celle-ci face aux valeurs voisines (1 [m] et 3 [m]). Un seuil de 1 [m] a le défaut d'être perturbé par la présence de végétation basse en lisière. De plus, en raison de la forme évasée des couronnes sur le MNH, il se peut que deux individus relativement proches soient délimités par une surface commune. Une délimitation individuelle de ceux-ci est préférable et évite que la surface projetée des couronnes soit ainsi surestimée (figure 7.3, cas A). L'effet sera plus ou moins prononcé selon l'algorithme d'interpolation utilisé. En revanche, un seuil de 3 [m] est sujet à ignorer les jeunes arbres. Cela peut se matérialiser par des incursions à l'intérieur du peuplement et ainsi rendre la délimitation des lisières très irrégulières et pas nécessairement réaliste (figure 7.3, cas B). Les surfaces des massifs possédant des lisières étagées se verront donc sous-estimées. Ces observations reposent essentiellement sur une analyse visuelle où les différents seuils sont superposés à l'orthophoto.

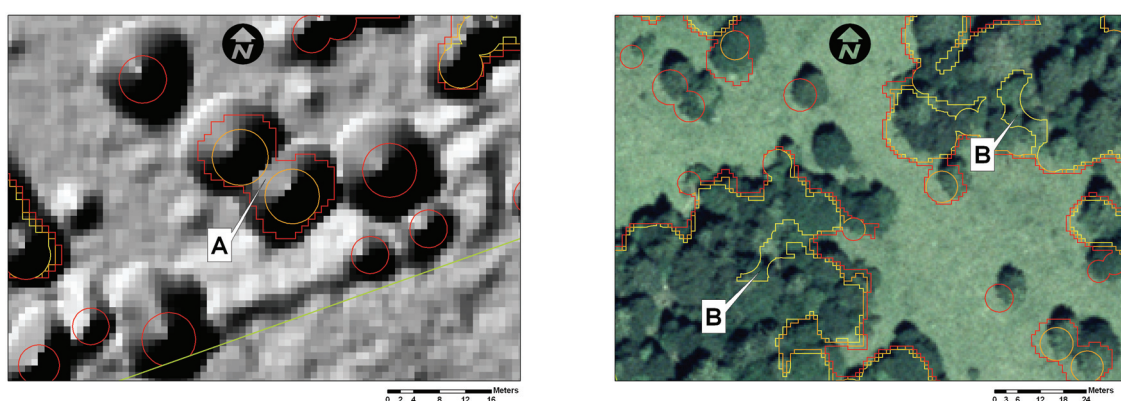


Figure 7.3. Influence de la hauteur du seuil pour la délimitation des surfaces densément boisées sur un pâturage boisé de la région de Mont-Tramelan (canton de Berne): seuil à 3 [m] en jaune, à 2 [m] orange et 1 [m] en rouge. Cas A: le seuillage à 1 [m] génère des agrégations en raison de la forme évasée des couronnes modélisées sur le MNH. Cas B: le seuillage à 3 [m] néglige les premiers arbres constituant la lisière.

L'image binaire est ensuite vectorisée par agrégation des pixels voisins de même classe. Les polygones restants subissent trois traitements:

- Les surfaces classées comme non boisées d'une taille inférieure à 100 [m²] sont reclassifiées en zones boisées. Cette étape a pour objectif de combler les petites ouvertures en peuplement. On peut raisonnablement penser qu'une ouverture dont la surface est inférieure à 100 [m²] aura peu de chance d'être accessible au bétail.
- Les zones boisées d'une surface inférieure à 200 [m²] sont éliminées afin de supprimer les délimitations se trouvant à l'emplacement des arbres isolés. En choisissant 200 [m²], on s'autorise à exclure les polygones d'une superficie équivalente à la couronne d'un arbre ayant un rayon moyen de 8 [m]. Les arbres isolés seront mieux modélisés par l'approche individuelle qui se révèle moins sensible à la déformation des couronnes inhérente au processus d'interpolation.
- La totalité des surfaces classées comme non boisées sont finalement éliminées et seuls les polygones délimitant les massifs boisés subsistent.

La succession des traitements définis précédemment sont illustrés par la figure 7.4.

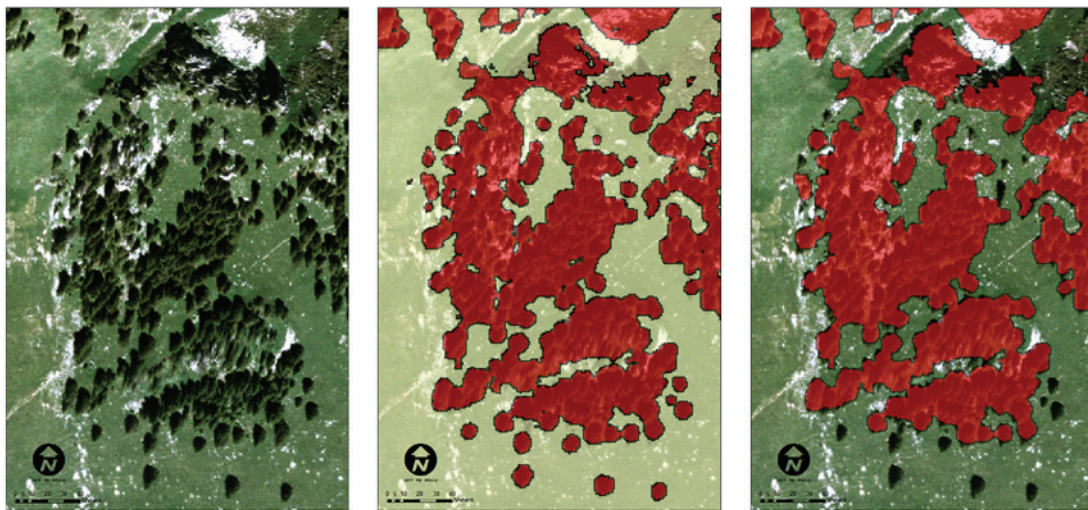


Figure 7.4. Traitements pour la correction des polygones délimitant les massifs boisés. A gauche, l'orthophoto d'un secteur de pâturage boisé sur le canton de Berne. Au centre se trouve le résultat de la vectorisation des seuils, avec en foncé les polygones classés comme «boisés» et en clair les polygones classés comme «non boisés». L'image de droite illustre les seuils résultants des trois traitements (seuils filtrés).

7.4.2. APPROCHE INDIVIDUELLE

Le principal objectif de cette approche est de localiser les arbres isolés du pâturage boisé, avant de leur attribuer une surface de couronne.

EXTRACTION DES SOMMETS

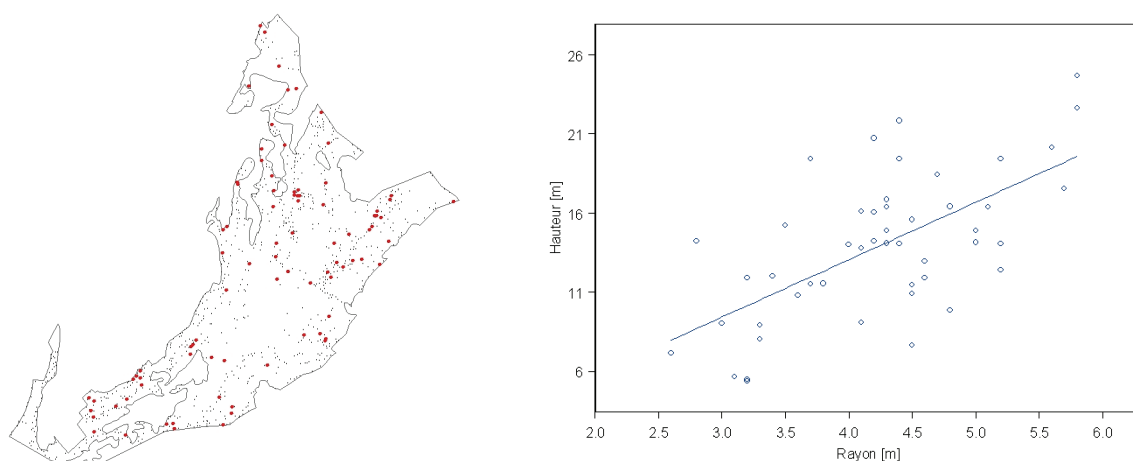
La localisation des arbres isolés s'appuie sur la méthode des maxima locaux. Cette dernière revient à appliquer un filtre de convolution à une image. Elle se base sur la détermination d'objets ponctuels correspondant de manière physique à une valeur maximale à l'intérieur de la fenêtre d'analyse (ou fenêtre de convolution). Cela revient concrètement à parcourir une image en comparant la valeur du pixel central avec la valeur maximale rencontrée dans son voisinage proche¹. Une fois les sommets déterminés, une hauteur leur est attribuée sur la base du MNH. Afin de ne préserver que les arbres d'un diamètre supé-

1. Plus de détails sont donnés dans le chapitre 4 consacrés à la localisation des sommets

rieur à une valeur donnée, les sommets d'une hauteur inférieure à 2 [m] sont filtrés.

CALCUL DE LA TAILLE DE COURONNE

Afin d'estimer une surface de couvert à chaque arbre isolé, un modèle mathématique simple permet de calculer un diamètre de couronne à partir d'une hauteur LiDAR donnée. Ce modèle repose sur une régression linéaire entre la hauteur de sommet observée sur le MNH et le rayon de couronne associé mesuré sur le terrain. Cette approche permet de passer d'une information ponctuelle à un modèle circulaire d'arbre dont la surface dépend directement de la hauteur. L'établissement du modèle mathématique et sa validation repose sur une approche par échantillonnage aléatoire. 87 sommets ont été choisis parmi une population totale de 900 sommets pour un pâturage représentatif situé à la Vue-des-Alpes (Neuchâtel). La taille de l'échantillon offre un intervalle de confiance de 90%. La distribution statistique des hauteurs de l'ensemble des échantillons tirés aléatoirement a été comparée à la distribution des hauteurs de la population totale afin de prévenir tout biais. Les deux distributions sont similaires, ce qui laisse supposer une bonne représentativité de l'échantillonnage. Cartographiés, les 87 sommets choisis ont fait l'objet d'une campagne de mesure du rayon. La méthode de mesure utilisée est la chevillère assurant une précision de l'ordre de 0,1 [m]. La robustesse du modèle linéaire choisi est faible ($R^2 = 0.41$). Ceci s'explique principalement par la grande diversité de formes des couronnes. La distribution symétrique de l'erreur de part et d'autre du modèle (médiane = 0.08) permet cependant de croire à une bonne pertinence statistique du modèle. De plus, on observe une nette différence de modèle notamment entre les résineux et les feuillus. Ces derniers restent toutefois minoritaires dans les pâturages boisés de l'arc jurassien.



$$\text{Rayon} = 0.1117 \cdot \text{Hauteur} + 2.6894$$

Figure 7.5. L'image de gauche illustre la distribution spatiale des points d'échantillonnage (rouge) par rapport à la population totale (gris). Le graphique de droite illustre le résultats de la régression linéaire entre la hauteur tirée du MNH et le rayon de couronne mesuré sur le terrain.

Comme le montre la figure 7.6, l'identification des arbres isolés fonctionne en général très bien. Cela est d'autant plus vrai que les pâturages de l'arc jurassien sont en grande majorité composés de conifères (sapins et épicéas). En revanche, dans les massifs plus denses, la couverture délimitée par les couronnes individuelles ne permet pas de définir une surface uniforme et représentative de la lisière. Cette lacune est justement comblée par l'approche par seuillage.

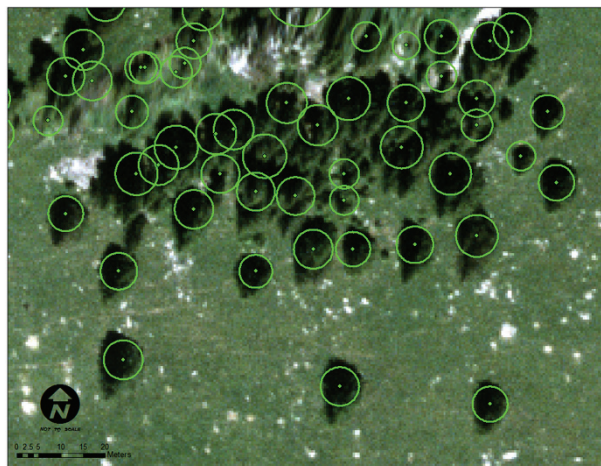


Figure 7.6. Identification des arbres individuels par la méthode des maxima locaux.

Source de données: Orthophoto SWISSIMAGE; © 1998 Office fédéral de topographie (www.swisstopo.ch).

7.4.3. ELIMINATION DES SURFACES BÂTIES

Il se peut qu'un ou plusieurs bâtiments (fermes, entrepôts, etc.) soit présents à l'intérieur de la délimitation administrative du pâturage boisé. Sans classification a priori de ces éléments, ils seront ainsi modélisés sur le MNH au même titre que les arbres. Ils vont ainsi générer une surface, par le biais de l'une ou l'autre des approches, qu'il faudra éliminer pour ne pas fausser le calcul. Ces cas de figure sont rares. Une méthode simple et efficace consiste à s'aider d'une orthophoto du site (ou du plan d'ensemble) et éliminer manuellement les polygones superposés aux bâtiments identifiés. Si nécessaire, une élimination des constructions sur le MNH peut se réaliser en amont de la délimitation de la surface boisée. Deux options pour automatiser un tel processus sont alors envisageables:

1. Une classification préalable du nuage de points bruts permet d'exclure les mesures relatives aux constructions avant le processus d'interpolation. Ce type de traitement est notamment réalisable grâce à une application métier comme TerraScan (www.terrasolid.fi).
2. En disposant de données cadastrales numériques, il est possible d'appliquer une transformation du MNS raster en remplaçant les pixels se trouvant à l'intérieur des polygones de bâtiment par les pixels du MNT. Ce type de traitement nécessite de s'assurer du bon calage des objets vecteur avec le MNH.

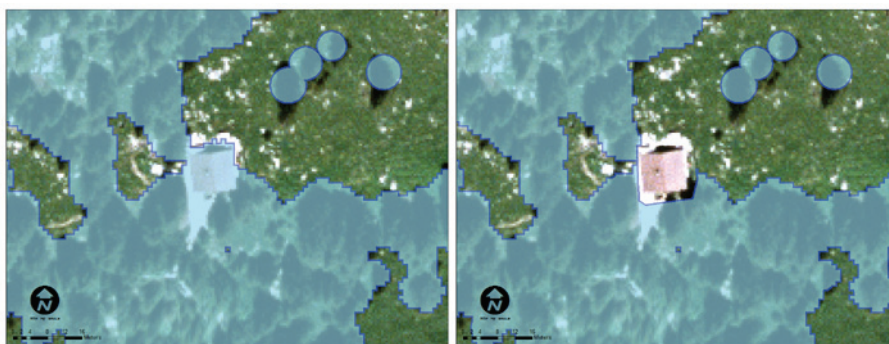


Figure 7.7. Elimination manuelle des surfaces bâties avec l'orthophoto comme référence.

Source de données: Orthophoto SWISSIMAGE; © 1998 Office fédéral de topographie (www.swisstopo.ch).

7.4.4. CALCUL DU TAUX DE BOISEMENT

La surface totale de couvert résulte de l'union des polygones déterminés par les deux approches complémentaires décrites précédemment. Le taux de boisement est calculé en faisant le rapport entre la surface totale de couvert et la surface du pâturage boisé déduite de sa délimitation légale (découpage cadastral).

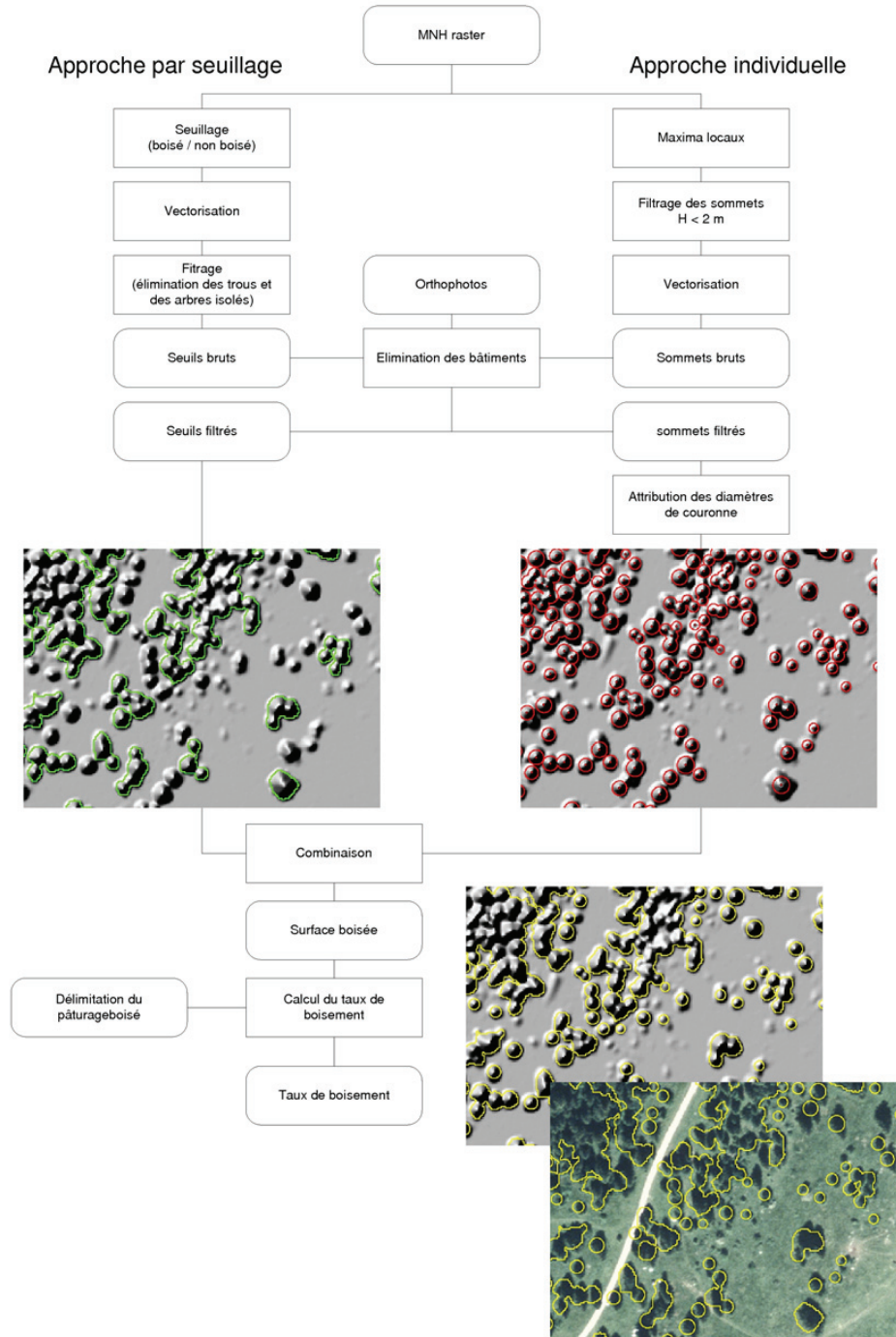


Figure 7.8. Schéma méthodologique pour le calcul du taux de boisement. Deux approches pour le calcul des diamètres de couronnes sont présentés. Orthophoto: SWISSIMAGE, © 1998 Office fédéral de topographie. MNS-MNT-MO: © 2001 Données de la mensuration officielle (www.swisstopo.ch).

7.5. APPLICATION AU SITE DE MONT-TRAMELAN

La délimitation des surfaces boisées sur la parcelle 14 du site de Mont-Tramelan sont illustrées par la figure 7.9.

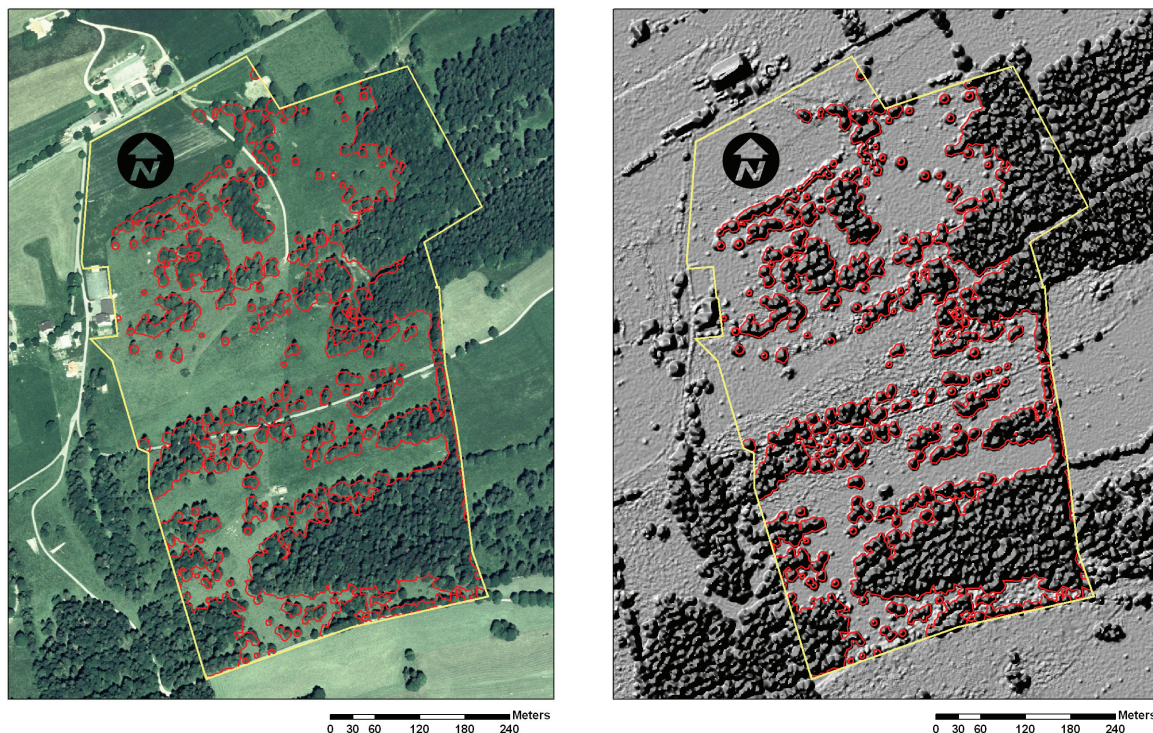


Figure 7.9. Illustration de la délimitation des surfaces boisées sur la parcelle 14 (Mont-Tramelan).

Orthophoto: SWISSIMAGE, © 1998 Office fédéral de topographie.

MNS-MNT-MO: © 2001 Données de la mensuration officielle (www.swisstopo.ch).

Les tableaux 7.2 et 7.3 donnent les résultats de taux de boisement calculés pour la parcelle 14 (Mont-Tramelan) selon les différentes méthodologies présentées.

	Méthode traditionnelle				Méthode LiDAR
	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	
Surface boisée	9.03 [ha]	10.10 [ha]	7.57 [ha]	8.38 [ha]	10.46 [ha]
Taux de boisement	33%	36%	27%	30%	37%

Tableau 7.2. Tableau comparatif des taux de boisements calculés sur la parcelle 14 (Mont-Tramelan).

Afin d'homogénéiser les travaux issus des différentes campagnes d'acquisition, les résultats du tableau 7.3 ont été calculés sur une surface totale de pâturage légèrement réduite (28 [ha] au lieu des 32 [ha]).

De manière systématique, on observe que la technologie LiDAR a tendance à surestimer le taux de boisement par rapport aux méthodes de photo-interprétation (de 1 à 10%). Les écarts entre les résultats des variantes fluctuent également jusqu'à 6% pour les relevés faits en 2000. Cet écart monte à 9% si le relevé de 1999 est pris en considération. Il est cependant important de mentionner que la parcelle 14 a souffert de l'ouragan Lothar de décembre 1999 ce qui peut expliquer le taux de boisement plus important relevé pour la variante 2. Malgré cela, l'écart de 6% révélé entre les variantes 2 et 4 ne se justifie pas uniquement par l'épisode Lothar, mais illustre aussi une incertitude liée à l'interprétation de l'opérateur.

	Méthode CLAPA	Méthode LiDAR
Surface de boisés	13.32 [ha]	12.46 [ha]
Taux de boisement	41.2%	38.8%

Tableau 7.3. Tableau comparatif des taux de boisements calculés sur la parcelle 14 (Mont-Tramelan).

La méthode CLAPA donne un résultat proche de la méthode LiDAR avec un écart de 2.4%. La faible différence relevée peut encore être atténuée en prenant en compte l'événement climatique ponctuel de Lothar. Les taux de boisement sont calculés ici sur la surface totale de 32 [ha].

Alors que la délimitation des lisières ne pose pas de réel problème, l'identification des arbres isolés mérite quelques commentaires. Il arrive par exemple que deux arbres dont les couronnes sont très imbriquées ne soient détectés que par un seul sommet. Même si la surface totale des couronnes risque d'être sous-estimée, l'influence est minime à l'échelle du pâturage où le cas inverse risque par ailleurs de se produire. Un autre problème constaté, révélé sur plusieurs pâturages boisés, concerne la modélisation des feuillus. Certains individus ont une hauteur nettement inférieure à la réalité ou sont totalement oubliés. Ces cas rares sont dus à un manque de retour LiDAR sur les couronnes. Les causes les plus probables sont un problème technique durant l'acquisition ou la planification inadaptée du vol avec un survol hors de la période de végétation.

7.6. SYNTHÈSE ET CONCLUSION

La méthodologie développée pour la détermination du taux de boisement dans les pâturages boisés offre des résultats équivalents en précision en regard des méthodes actuellement en vigueur. Le fait qu'elle repose uniquement sur l'analyse du MNH la rend très robuste et assure une détermination équitable entre les différents sites. De par le pourcentage habituellement très majoritaire des conifères, ainsi que la densité moyenne à faible du couvert, l'exploitation des données LiDAR se prête particulièrement bien au contexte des pâturages boisés. Contrairement aux méthodes traditionnelles, qui s'appuient sur une photo-interprétation, les traitements décisifs sont automatisés. Dans la mesure où l'on exploite des modèles altimétriques qui ne sont pas spécifiquement traités, seule l'élimination des surfaces détectées sur les constructions nécessitent l'intervention d'un opérateur. Cette étape peut toutefois être évitée si les bâtiments et autres constructions anthropiques sont filtrés au préalable. La superposition de la délimitation finale des surfaces boisées sur l'orthophoto reste toutefois un bon moyen de contrôler rapidement la bonne cohérence du résultat.

Il est essentiel d'insister sur le fait que la méthodologie développée a pour objectif la détermination d'un taux de boisement à l'échelle d'un pâturage boisé de plusieurs hectares ou dizaines d'hectares. Elle apporte un élément de solution pour la détermination des surfaces boisées nécessaires à la mise à jour des surfaces agricoles utiles, mais ne visent pas une modélisation dans le but de fournir un outil dédié à l'aménagement forestier pour compter précisément le nombre de tiges ou estimer le volume de bois.

Suite aux travaux réalisés au LaSIG, une application nommée «Paturages» a été développée afin d'intégrer l'ensemble des étapes méthodologiques en une seule interface (figure 7.10). Les travaux de programmation ont été réalisés par le bureau Arias¹ à Berne. Le résultat prend la forme d'une extension aux logiciels d'ESRI ArcGIS 9.1 et ArcView 3.x. Aucun module supplémentaire n'est nécessaire outre la version de base. La surface boisée (en [m²]) et le taux de boisement (en % de la surface de la parcelle) sont déterminés pour chaque parcelle. Ces paramètres sont finalement mémorisés dans un tableau. Si nécessaire, et selon le type de pâturage boisé, il est possible d'ajuster les paramètres de la fonction qui définit le diamètre de la couronne pour les arbres individuels, ainsi que les paramètres de correction des seuils.

1. <http://www.arias.ch/project/welcome.html>, novembre 2007.

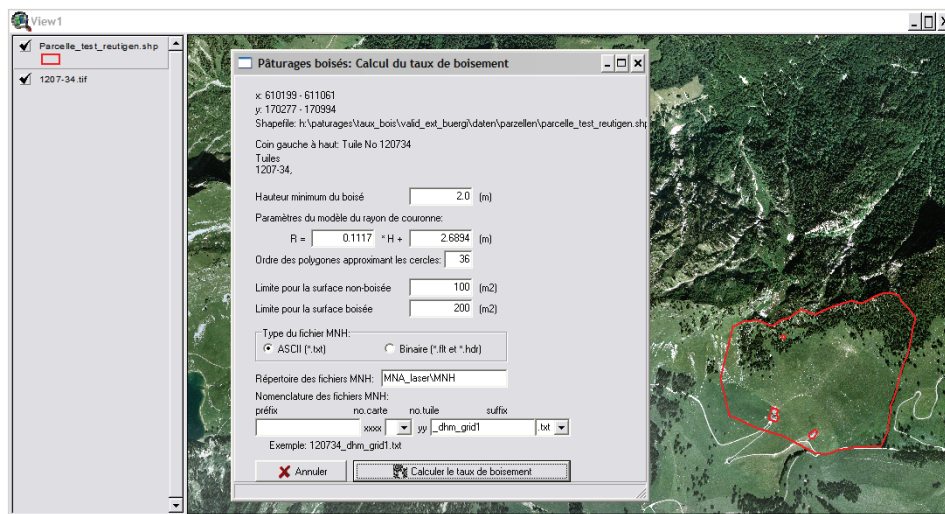


Figure 7.10. Interface de l'extension «Pâturages» dans le logiciel ArcView 3.3.

La modélisation du diamètre de couronne par une simple régression suffit pour l'objectif général qui est fixé, à savoir la détermination d'un taux de boisement à l'échelle du pâturage boisé. L'estimation du diamètre de couronne reste cependant un point de la méthodologie qui doit être amélioré pour des besoins plus spécifiques. En terme d'évolution, il serait encore intéressant de calculer dans un second temps la longueur et l'élongation des couronnes par l'analyse de la distribution des hauteurs de points bruts à l'intérieur de chaque polygone. Cette information peut s'avérer précieuse pour déterminer un indicateur qui renseignerait sur l'emprise au sol de la couronne. Cette dernière propriété s'avère utile pour tenter de distinguer les arbres susceptibles d'offrir au bétail une aire de pacage qui s'étendrait jusqu'au tronc.

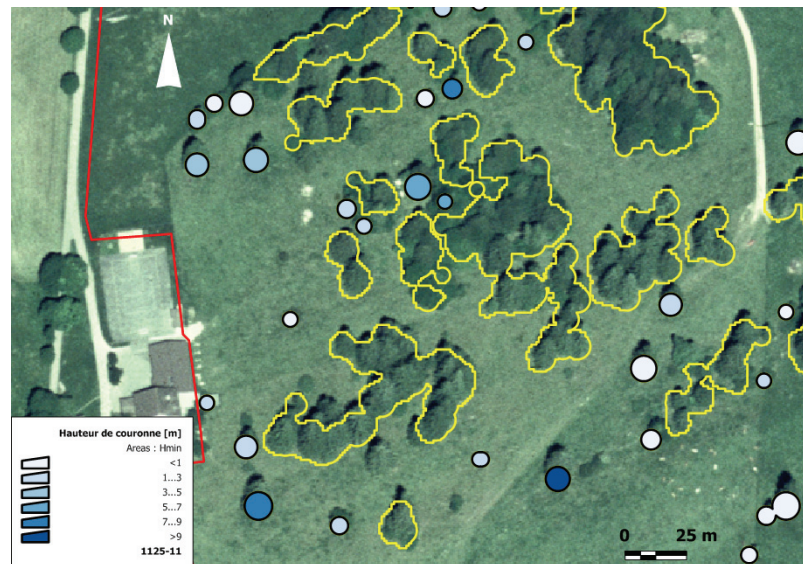


Figure 7.11. Cartographie de la hauteur des couronnes pour les arbres détectés par la méthode individuelle. Cette hauteur correspond à la hauteur minimale des points bruts dans le voisinage du sommet.

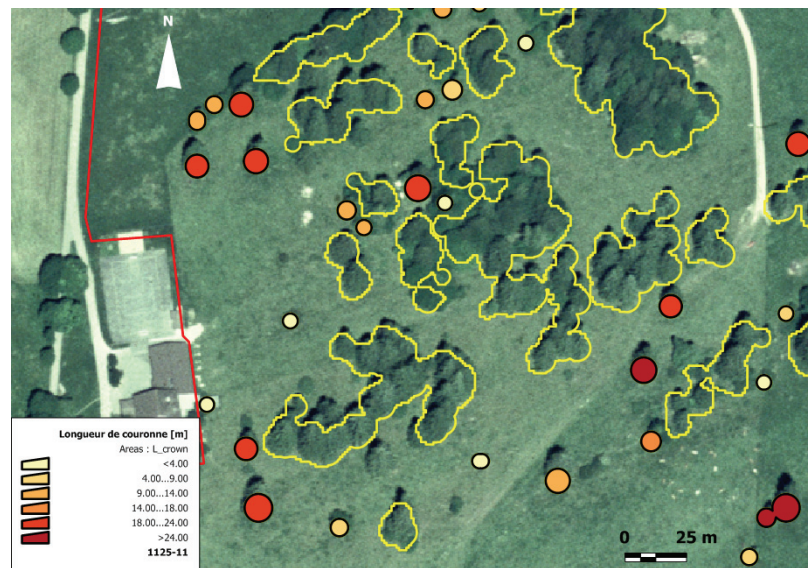


Figure 7.12. Cartographie de la longueur des couronnes pour les arbres détectés par la méthode individuelle. Cette longueur correspond à la différence entre la hauteur maximale et minimale des points bruts dans le voisinage du sommet.

Pour le praticien, la délimitation automatisée du couvert par l'analyse du MNH constitue avant tout une aide efficace qui repose sur un outil paramétrisable, en mesure de compléter de manière objective et robuste l'information contenue dans l'orthophoto. La complémentarité entre ces deux sources d'information sera d'autant plus pertinente que leurs dates d'acquisition seront proches. La méthodologie présentée dans ce chapitre permet l'estimation d'un taux de boisement à l'intérieur d'un périmètre (administratif) défini. Le chapitre suivant, qui complète d'une certaine manière cette première étude, concerne la délimitation automatique de différentes classes de taux de boisement. Ces dernières, qui répondent à une problématique de gestion, sont définies au préalable.

CLASSIFICATION DE LA DENSITÉ DU COUVERT

8.1. PROBLÉMATIQUE

Les pâturages boisés sont des milieux dynamiques qui évoluent en permanence suite aux interventions forestières et agricoles, à la croissance propre des végétaux et aussi aux pressions exercées par le tourisme. Ils se définissent structurellement par l'assemblage complexe de communautés végétales élémentaires muscinales, herbacées (prés pâturés, pelouses, ourlets,...), arbustives (fourrés, manteaux, buissons) et arborescentes (arbres isolés ou en bosquets plus ou moins denses et étendus) (Gallandat et al., 1995). Ces milieux de production mixtes, servant aussi bien à la production animale qu'à l'économie forestière sont assimilés juridiquement à la forêt. Ils produisent du bois et accueillent le bétail durant la période de végétation. Les pâturages boisés sont également un lieu de détente et de loisirs. Leur beauté paysagère ainsi que leur riche biodiversité attirent de plus en plus de visiteurs en quête de nature et d'évasion.

Les pâturages boisés ont des structures diversifiées selon la région, l'altitude (entre 900 et 1600 [m]) et le taux de boisement. Leur conservation ne peut se concevoir sans une connaissance approfondie de leur organisation. La cartographie à grande échelle (1:10'000 ou 1:5'000) permet l'analyse des types de phytocénoses, des structures de l'exploitation pastorale et des unités de végétation.

Indispensable dans une perspective de développement spatial harmonieux, seule une véritable gestion intégrée peut remplacer les approches sectorielles qui ont prévalu jusqu'à ce jour (Miéville-Ott & Barbezat, 2005). Dans cette optique, un projet transfrontalier Interreg IIIA «Actions transfrontalières en faveur d'une gestion intégrée des paysages sylvo-pastoraux» entend maîtriser cette évolution. Les travaux entrepris portent sur l'élaboration d'une typologie commune des pâturages boisés et d'un plan de gestion intégré (PGI) attractif pour les gestionnaires et les usagers. Ce PGI est inspiré d'une simplification de l'étude PATUBOIS (Gallandat et al., 1995) et vise à une gestion durable des paysages sylvo-pastoraux.

On compte 17 phytocénoses dans la typologie simplifiée de Gillet et Ferrez (2006). Elles sont définies selon des valeurs environnementales, ainsi que sur la représentation quantitative des groupes socio-écologiques d'espèces herbacées. Le premier critère d'entrée dans la clé de détermination est le taux de boisement, soit le pourcentage de la surface du sol recouverte par la projection verticale du couvert. Ainsi, les 17 phytocénoses sont distribuées en quatre groupes établis par Gallandat et al. (1995):

- **Type 1000** (pâturages non boisés): taux de boisement nul ou inférieur à 1%; arbres isolés, peu ou très peu de buissons.
- **Type 2000** (pâturages peu boisés): taux de boisement compris entre 1 et 20%; texture fine (arbres pour la plupart isolés).
- **Type 3000** (pâturages très boisés): taux de boisement compris entre 20 et 70%; texture grossière (arbres pour la plupart regroupés en bosquets).
- **Type 4000** (bois pâturés et bois non pâturés): taux de boisement supérieur à 70%; texture quelconque.

L'étape initiale qui consiste à cartographier les grands types de phytocénoses à partir des taux de boisement est le prézonage. Dans la pratique, cette analyse repose sur une photo-interprétation.

Les cartes provisoires issues du prézonage servent ensuite de canevas pour la délimitation finale des phytocénoses observées. Cette ultime étape nécessite des relevés complémentaires sur le terrain. Les polygones définitifs délimitent des surfaces aussi homogènes que possible en prenant en compte le boisé, la profondeur du sol, les herbages, le sol, la topographie. Dans la pratique, l'attribution de l'un des quatre grands types de phytocénose à un polygone donné repose sur la moyenne de plusieurs taux de boisement estimés visuellement sur le terrain.

Ce chapitre a pour objectif de proposer deux nouvelles approches pour l'analyse provisoire de la répartition du boisé. Celles-ci reposent sur l'exploitation des données LiDAR et sont automatisables et facilement reproductibles. Dans un premier temps, le MNH permet d'extraire une information précieuse sur le pourcentage de recouvrement (première approche) ou encore sur la densité des tiges (nombre de tiges à l'hectare) (deuxième approche). Ensuite, ces informations doivent être retravaillées afin de permettre une délimitation aussi objective que possible des quatre grands types de phytocénoses. Il s'agira finalement d'établir si l'une des deux approches est à préconiser ou si au contraire elles se complètent.

Le pâturage de La Chaux (région de Tramelan, Berne) a servi de site de référence pour valider les méthodologies, grâce à un prézonage effectué par une approche classique couplant une photo-interprétation et une visite sur le terrain. L'exercice a ensuite été reconduit sur le site du Pré de Mollens (canton de Vaud).

8.2. ETAT DE L'ART DANS LE DOMAINE LiDAR

Alors que l'on trouve déjà des études abouties pour la délimitation des peuplements par la technologie LiDAR (Diedershausen et al. 2004; Lang et al., 2006), la considération des grands types de phytocénoses en pâturages boisés est un domaine de recherche encore inédit. L'analyse et la gestion des pâturages boisés reste il est vrai une problématique relativement marginale dans le monde de la foresterie.

En ce qui concerne l'estimation de la densité d'un couvert forestier (nombre de tiges à l'hectare) par l'exploitation des modèles altimétriques LiDAR, on distingue deux approches différentes. La première repose sur l'exploitation de fonctions complexes basées l'analyse des percentiles de la distribution des mesures de hauteur LiDAR ou sur des fonctions mathématiques (Weibull ou Johnson's SB) qui apportent une description de la structure verticale du couvert (Jerez et al., 2005; Maltamo et al., 2004). La seconde consiste à compter simplement le nombre d'individus identifiés par une analyse du MNH (Hyypä et al., 2001a; Leckie et al., 2003; Suárez et al., 2005a; Lee & Lucas, 2007). Les pâturages boisés ayant une structure verticale simple (généralement unistratifiée), c'est ce deuxième type d'approche qui a été privilégiée dans cette étude.

8.3. SITES ET SOURCES DE DONNÉES

8.3.1. SITES D'ÉTUDE

Deux sites ont été analysés successivement pour cette étude: tout d'abord le pâturage boisé de La Chaux (canton de Berne), puis le pâturage boisé du Pré de Mollens (canton de Vaud). Le site de La Chaux se situe au nord de Tramelan, dans le Jura bernois. Dominé par l'épicéa, il s'étend sur une surface de 87.8 [ha] et se trouve à une altitude moyenne de 1015 [m]. Alors que l'on a affaire à une couverture forestière relativement compacte en amont du pâturage, la partie en aval est très ouverte avec une présence majoritaire d'arbres isolés. Le Pré de Mollens s'étend sur le versant oriental du Haut-Jura vaudois avec une altitude comprise entre 1350 et 1600 [m]. Les 97.2 [ha] du pâturage boisé sont largement dominés par la présence de l'épicéa. On note néanmoins la présence de l'érable sycomore, du sapin blanc, du hêtre, du sorbier des oiseleurs et de l'alisier blanc.

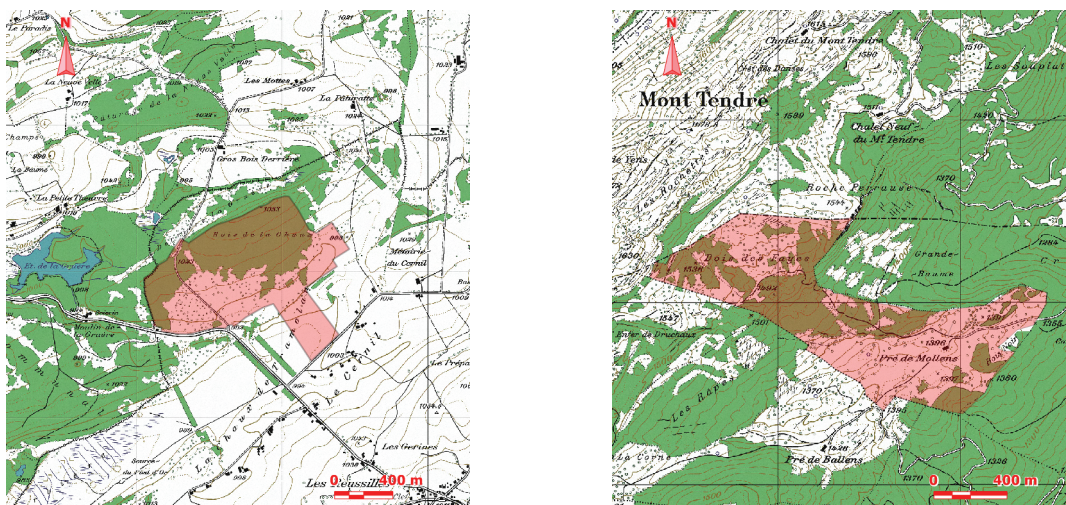


Figure 8.1. A gauche, la délimitation du pâturage boisé de La Chaux (canton de Berne); à droite, celle du Pré de Mollens (canton de Vaud).

CP25 © 2001 swisstopo (www.swisstopo.ch).

8.3.2. DONNÉES LIDAR ET ORTHOPHOTOS

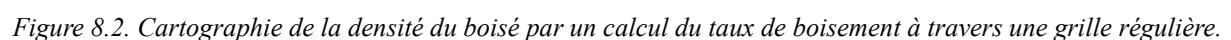
Le tableau 8.1 résume les données de télédétection à disposition ainsi que leurs dates d'acquisition pour les sites traités.

Site	Données LiDAR ^a		Données photographiques (orthophotos RGB)		
	Système	Date du vol	Caméra	Date du vol	Résolution spatiale
La Chaux (Berne)	ALTMS	2001	Leica RC30	1998	50 [cm]
Pré de Mollens (Vaud)	ALTMS	1er vol: fév./mar. 2001 2ème vol: oct. 2003	Leica RC30	1998	50 [cm]

Tableau 8.1. Tableau résumé des données utilisées pour l'étude consacrée à l'aide au prézonage.

- a. Les données techniques spécifiques aux systèmes LiDAR, ainsi que les paramètres des missions de vol, sont exposés au chapitre 3 «Source et nature des données LiDAR».

Cette approche se décompose en deux étapes (figure 8.2). Tout d'abord, les surfaces boisées sont délimitées par la méthodologie développée dans le chapitre 7 dédié à l'estimation du taux de boisement. L'approche combinée permet de prendre en considération aussi bien les secteurs densément boisés que les arbres isolés dans le pâturage. Les polygones ainsi produits sont «découpés» par une grille régulière. Du choix de la taille de la maille dépend l'échelle à laquelle est cartographié le phénomène. Un taux de boisement est finalement calculé à l'intérieur de chaque maille. Celles-ci sont ensuite classifiées puis agrégées selon les taux de boisement définis pour les quatre classes représentatives des grands types de phytocénoses.



8.4.1. APPLICATION AU PÂTURAGE BOISÉ DE LA CHAUX

Tout d'abord, les surfaces boisées ont été délimitées sur la totalité du pâturage par la méthodologie combinée¹ exposée au chapitre 7. Ces polygones ont ensuite été découpés sur la base de plusieurs grilles régulières (au format vecteur) afin de calculer un taux de boisement local pour chaque cellule du maillage (figure 8.3).

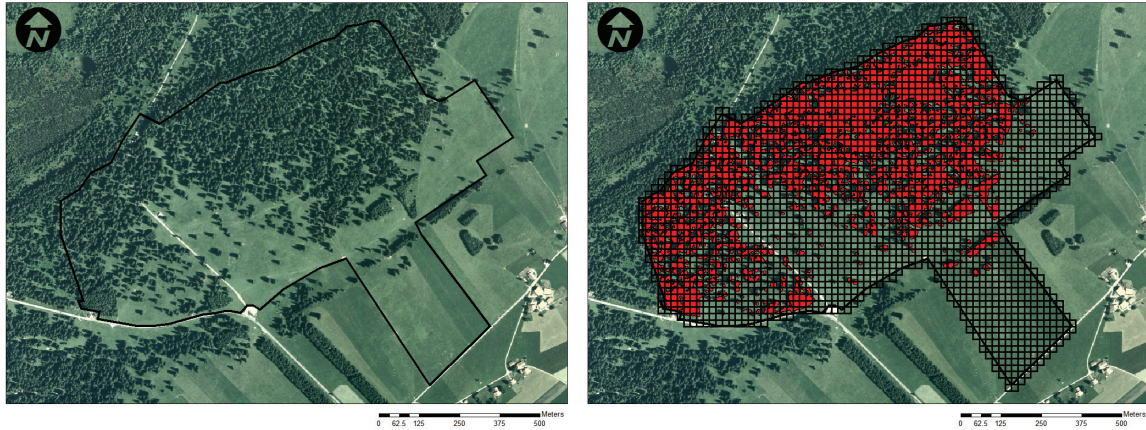


Figure 8.3. Illustration du découpage des surfaces par une grille régulière.

Source de données: Orthophoto SWISSIMAGE; © 1998 Office fédéral de topographie (www.swisstopo.ch).

Ces dernières sont finalement reclassifiées selon les 4 grands types de phytocénoses:

- type 1000: 0 à 1% de boisé
- type 2000: 1 à 20% de boisé
- type 3000: 20 à 70% de boisé
- type 4000: plus de 70% de boisé

Cette méthodologie a l'avantage de dériver du LiDAR un taux de boisement local qui peut être directement interprété selon la typologie 1000, 2000, 3000, 4000. La thématique et les unités sont les mêmes. Le choix de la maille de la grille régulière est un paramètre déterminant (figure 8.4). De petites cellules d'analyse (par exemple de 10 [m²]) permettent d'obtenir une cartographie qui suit relativement bien les contours des peuplements. Cependant, l'information trop locale ne permet pas une délimitation représentative et synthétique des secteurs faiblement boisés. Un type 2000 sera par exemple cartographié comme une mosaïque de 1000 et 3000. En choisissant une maille plus grande (par exemple 60 [m²]), le contexte pris en compte est élargit et la frontière entre les différents types de phytocénoses se révèle plus facilement. La précision de la délimitation des zones est cependant dégradée. La figure 8.5 permet de comparer le résultat d'une cartographie des quatre grands types de phytocénoses (résolution de la maille: 20 [m²]) avec le prézonage réalisé par une méthodologie conventionnelle, qui repose sur une photo-interprétation.

1. Délimitation du taux de boisement en combinant les résultats obtenus par l'approche par seuillage et par l'approche individuelle.



Figure 8.4. Comparaison de la cartographie des quatre grands types de phytocénoses avec 3 mailles d'analyse différentes: à gauche 10 [m²], au centre 20 [m²] et à droite 30 [m²].

Source de données: Orthophoto SWISSIMAGE; © 1998 Office fédéral de topographie (www.swisstopo.ch).

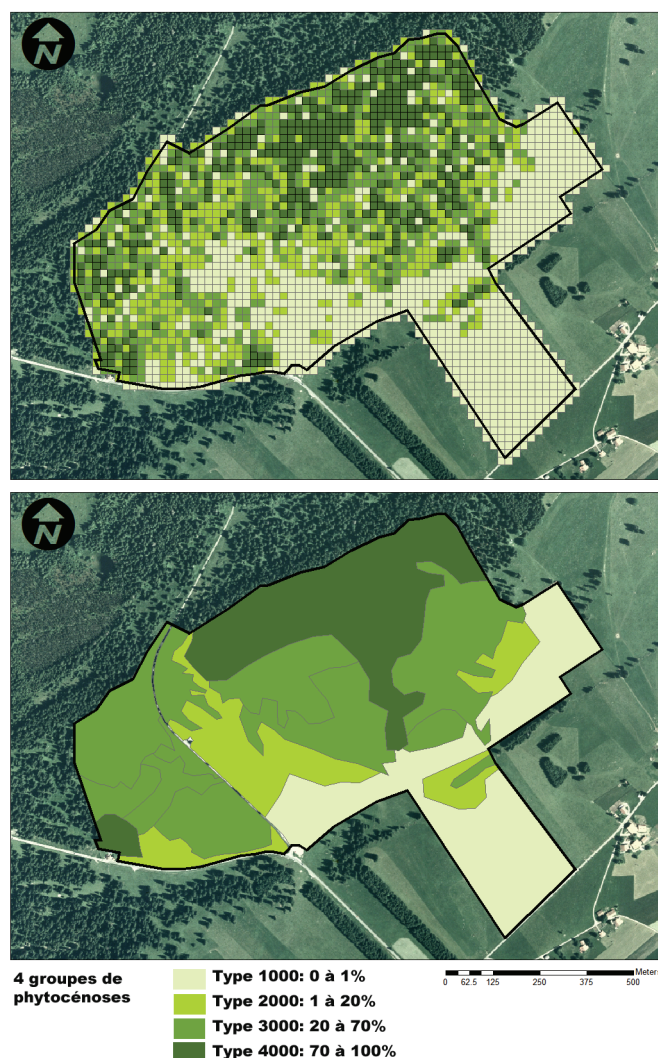


Figure 8.5. Comparaison de la cartographie des quatre grands types de phytocénoses par classification du taux de boisement à travers une grille régulière (avec une maille régulière de 20 [m])(en haut) et par la méthodologie traditionnelle (en bas).

Source de données: Orthophoto SWISSIMAGE; © 1998 Office fédéral de topographie (www.swisstopo.ch).

8.5. CLASSIFICATION DE LA DENSITÉ DES SOMMETS

Cette seconde approche repose sur une analyse de la distribution des arbres composant le pâturage boisé (figure 8.6). Tout d'abord, les sommets du MNH sont extraits par l'algorithme des maxima locaux. Une information sur la densité locale du couvert est ensuite extraite à travers un maillage régulier. L'algorithme calcule pour chaque maille (ou pixel) une densité de sommets (individus) à l'intérieur d'un voisinage circulaire. Une image de densité au format raster est produite comme résultat intermédiaire. L'étape clé de l'analyse consiste alors à reclassifier les pixels du modèle continu, afin de délimiter quatre classes représentatives des grands types de phytocénoses. L'étape finale est la vectorisation des délimitations.

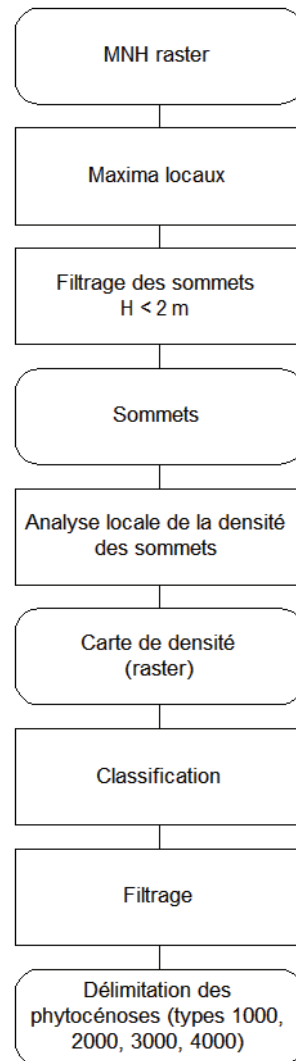


Figure 8.6. Cartographie de la densité du boisé par une analyse de la distribution des sommets.

Concrètement, le calcul de densité des sommets a été réalisé avec le logiciel ArcGIS et la fonction «Point Density» (figure 8.7). Les paramètres ajustables sont la résolution spatiale (D) de la grille résultante, ainsi que la taille du rayon (R) définissant le voisinage d'analyse. Un prézonage, réalisé par une méthodologie conventionnelle, était à disposition pour le pâturage boisé de La Chaux avant même les premières investigations. Cette référence a notamment servi à calibrer les paramètres D et R et surtout à ajuster les valeurs de seuil pour la classification finale des quatre grands types de phytocénoses.

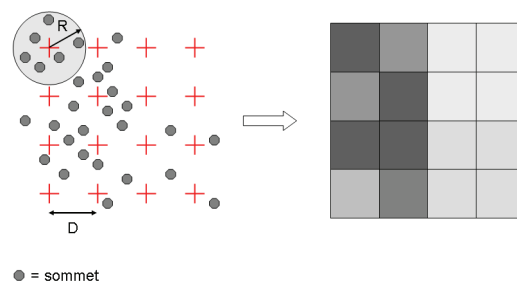


Figure 8.7. Cartographie de la densité des sommets. Les paramètres ajustables sont la résolution spatiale (D) de la grille résultante, ainsi que la taille du rayon (R) définissant le voisinage d'analyse.

La grille reclassifiée est ensuite filtrée afin d'éliminer les petits groupes de pixels isolés et non représentatifs d'une classe (type 1000, 2000, 3000 ou 4000). Ce traitement favorise une délimitation plus homogène. Le filtre modal (ou majoritaire; «*majority filter*» dans la littérature anglaise) analyse le voisinage direct de chaque pixel et lui réattribue la valeur du pixel qui s'y trouve en majorité. Ce filtre a l'avantage de pouvoir être appliqué plusieurs fois de suite, jusqu'à ce que le résultat visuel soit satisfaisant (figure 8.8). Finalement, la grille classifiée et filtrée est vectorisée. Les polygones gardent pour attribut le type de phytocénose. Il est ensuite possible, sur la base de ce nouveau découpage, de recalculer un taux de boisement par polygone. Cette nouvelle information est un moyen de contrôle qui permet de s'assurer de la bonne cohérence des résultats.

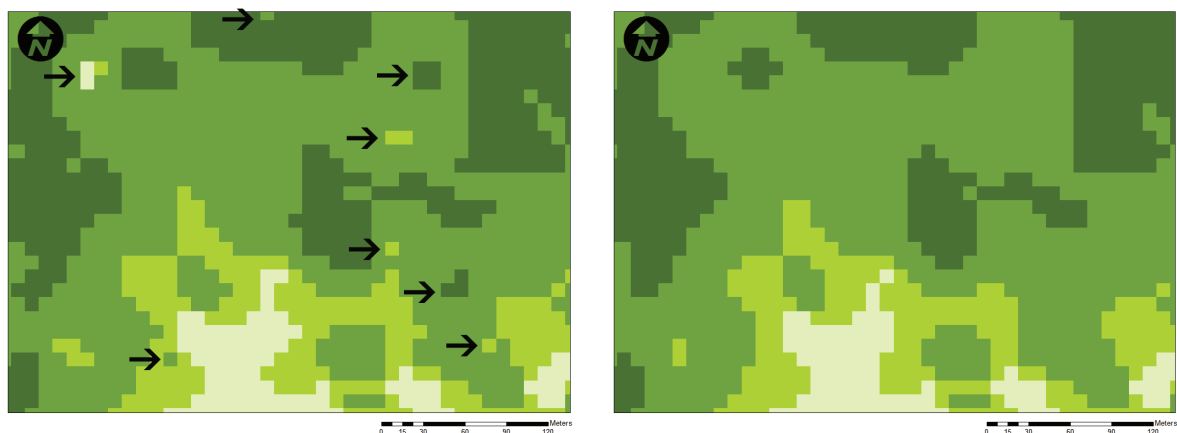


Figure 8.8. Filtrage de la grille finale («*majority filter*»), afin d'homogénéiser les classes (représentées par des niveaux de gris distinctifs).

8.5.1. APPLICATION AU PÂTURAGE BOISÉ DE LA CHAUX

Dans un premier temps, une série d'expérimentations a été réalisée afin de définir les paramètres optimaux pour le prézonage:

CARTE DE DENSITÉ DES SOMMETS

Le choix des valeurs optimales pour la résolution de la grilles (D) et la taille du rayon (R) définissant le voisinage d'une maille s'est fait à travers une série de tests. Les valeurs évaluées sont résumées dans le tableau 8.2.

Résolution de la grille de sortie (D)	1 [m], 10 [m], 20 [m]
Rayon définissant le voisinage (R)	10 [m], 30 [m], 45 [m], 60 [m]

Tableau 8.2. Paramètres évalués pour le calcul des cartes de densité des sommets.

Plus la résolution de la grille de sortie est élevée, plus la délimitation des contours du boisé est précise. En choisissant une maille d'1 [m], le rendu cartographique des classes n'est cependant pas assez généralisé et il devient difficile d'extraire une lisière nette et régulière. A l'inverse, une résolution de 20 [m] ou inférieure généralise trop les secteurs peu à très peu boisés et, par conséquent, n'est plus adaptée à la problématique des pâturages boisés. Une maille de 10 [m] ou légèrement inférieure est donc à préconiser (figure 8.9).

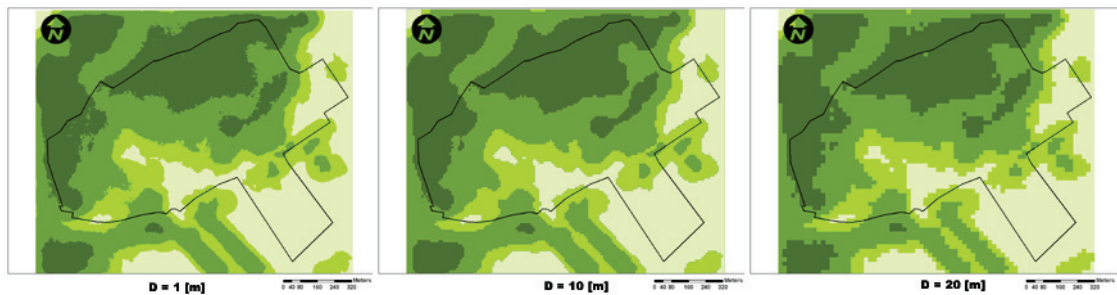


Figure 8.9. Cartographie des quatre grands types de phytocénoses avec trois différentes résolutions de maille (paramètre D): 1 [m] (à gauche); 10 [m] (au centre) et 20 [m] (à droite). Le rayon d'analyse est fixé à 60 [m].

La taille du rayon d'analyse pour le calcul de densité agit comme un facteur d'échelle sur la cartographie des phytocénoses. Choisir un grand rayon, revient à lisser l'image. On perd certains détails (petits collectifs d'arbres, petites trouées en peuplement), mais on gagne en lisibilité pour les petites échelles d'analyse. Un trop petit rayon de recherche ne permet plus de considérer un voisinage suffisant pour le calcul de densité et l'information, trop locale, n'apporte pas une plus-value significative par rapport au matériel photographique. Le juste compromis semble donc se trouver pour des valeurs de rayon (R) comprises entre 30 et 45 [m] (figure 8.10).

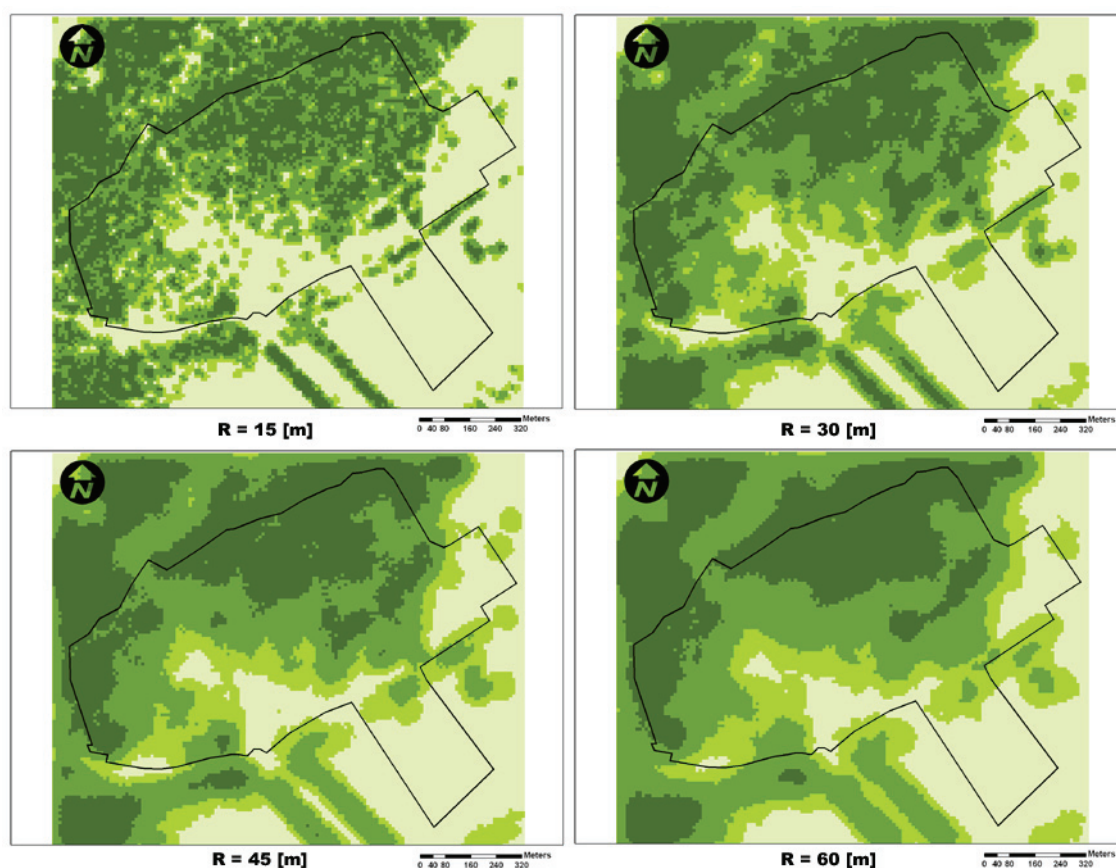


Figure 8.10. Cartographie des quatre grands types de phytocénoses avec quatre différents rayons de recherche (paramètre R): 15 [m], 30 [m], 45 [m], 60 [m]. La résolution des grilles est fixée à 10 [m].

CLASSIFICATION DES QUATRE GRANDS TYPES DE PHYTOCÉNOSES

Le processus de classification est l'étape clé de la méthodologie. Il s'agit de définir la correspondance entre la valeur des pixels de la carte de densité et les catégories de taux de boisement définies pour chacune des phytocénoses (type 1000, 2000, 3000 et 4000). Les valeurs ont été définies de manière empirique, avec pour référence le prézonage réalisé par la méthodologie conventionnelle.

Phytocénoses	Densités [tige/km ²]
type 1000	0 - 0.002
type 2000	0.002 - 0.007
type 3000	0.007 - 0.02
type 4000	> 0.02

Tableau 8.3. Tableau de correspondance entre la densité des sommets et la classe de taux de boisement.

Les seuils de densité présentés dans le tableau 8.3 ne sont pas forcément généralisables. Un ajustement est souhaitable pour chaque nouvelle configuration. Les cartographies des taux de boisement locaux issues de la première méthodologie se révèlent ainsi d'une grande utilité pour positionner les seuils. Ces derniers ont pu être déplacés itérativement jusqu'à ce que les délimitations des quatre classes définies s'ajustent géographiquement avec des valeurs cohérentes de taux de boisement.

PRÉZONAGE FINAL POUR LE PÂTURAGE BOISÉ DE LA CHAUX

Le prézonage final pour le site de La Chaux a été réalisé avec une maille de 10 [m] et un rayon d'analyse de 45 [m]. La grille reclassifiée avec les paramètres définis par le tableau 8.3 a ensuite été filtrée (deux passages avec le filtre modal) pour éliminer les petites irrégularités et finalement vectorisée. Le résultat est présenté par la figure 8.11.

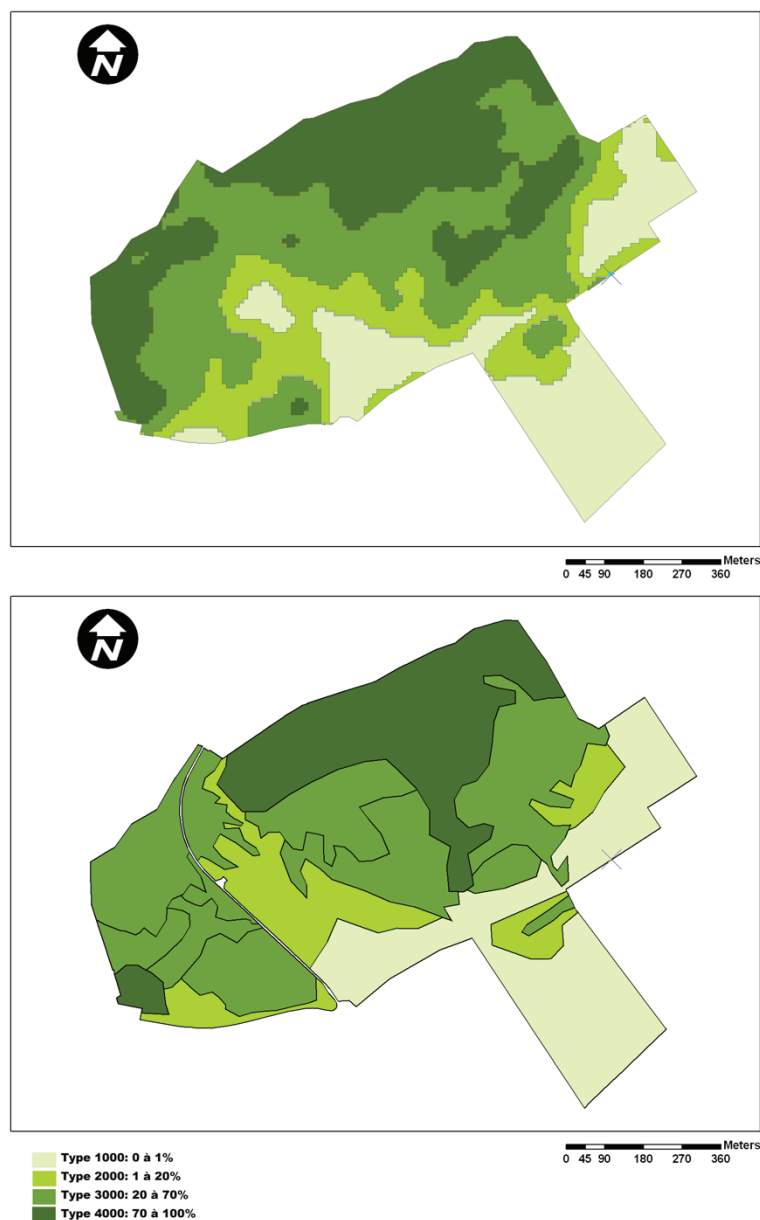


Figure 8.11. Comparaison entre le résultat final du prézonage sur le site de La Chaux avec la méthode reposant sur la classification de la densité des sommets (en haut) et le prézonage réalisé par la méthodologie traditionnelle (en bas).

Cette première tentative apparaît satisfaisante, notamment pour les types 1000 et 2000. Les différences observées pour les types 3000 et 4000 sont moins faciles à expliquer. Une étude complémentaire a été réalisée afin de vérifier si le taux de boisement à l'intérieur de chaque polygone issus de la méthodologie LiDAR appartenait bien à la classe déterminée. Concrètement, la délimitation du boisé calculée pour la première approche (combinaison de l'approche par seuillage et de l'approche individuelle) a été découpée selon le résultat du prézonage LiDAR final. Un taux de boisement a ainsi pu être recalculé à l'intérieur de chaque polygone. En fonction de sa valeur (0-1%; 1-20%; 20-70%; 70-100%), un type de

phytocénose, nommé «type_2», a été réattribué. La figure 8.12 est une cartographie de la différence entre le type attribué par le prézonage LiDAR (réalisé par classification de la densité des sommets) et le «type_2» recalculé sur la base de la délimitation du boisé.

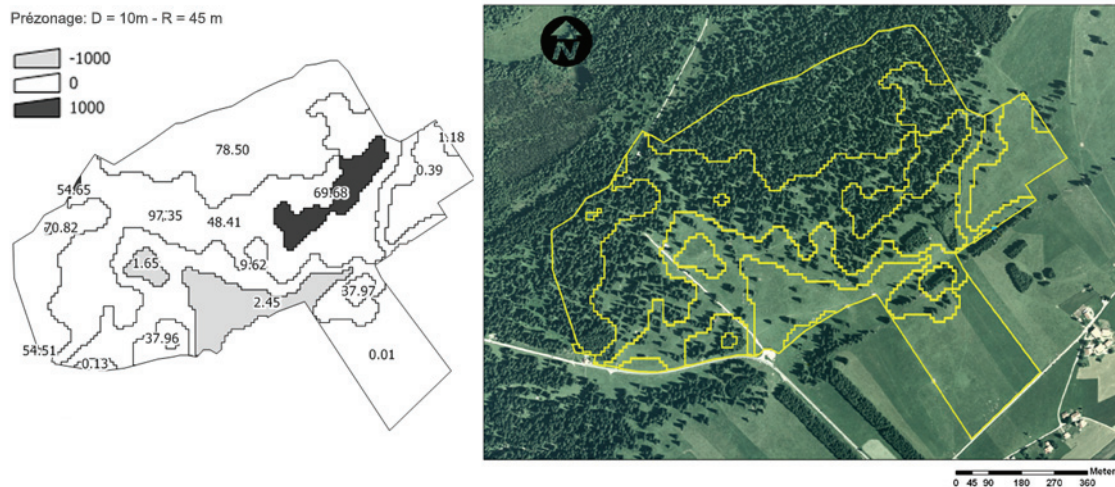


Figure 8.12. Validation du prézonage. A gauche, une carte illustrant les différences entre les types issus du prézonage et les taux de boisement recalculés a posteriori sur la base des délimitations du boisé. A droite, une superposition des limites issues du prézonage sur l'orthophoto.

Source de données: Orthophoto SWISSIMAGE; © 1998 Office fédéral de topographie (www.swisstopo.ch).

Sur l'ensemble des 16 polygones du site de La Chaux, seuls quatre polygones montrent un écart d'une classe. Deux polygones classés en type 1000 ont été reclassifiés en type 2000 par le calcul du taux de boisement. Un polygone classé en type 4000 a été reclassé en type 3000 par le calcul du taux de boisement. Ces variations ne sont cependant pas significatives et on peut affirmer que la cohérence entre les délimitations du prézonage par classification de la densité des sommets et le taux de boisement recalculé pour chacune d'elles est conforme aux attentes. Les différences observées concernent des polygones dont le taux de boisement est proche d'une limite de classe. Par exemple, l'erreur de classification du polygone entre le type 3000 et 4000 tient à moins d'un demi-pour-cent (69.68%), ce qui n'est pas suffisant pour remettre en cause le prézonage. La superposition des limites du prézonage avec l'orthophoto illustre également une assez bonne homogénéité de la distribution du boisé à l'intérieur des polygones.

8.6. EVALUATION D'UNE APPROCHE COMBINÉE

Sur la base des premiers résultats obtenus sur le pâturage boisé de La Chaux, une nouvelle stratégie a été adoptée pour le site du Pré de Mollens (figure 8.13). L'approche par classification de la densité des sommets sert à réaliser la cartographie des phytocénoses (prézonage primaire). En parallèle, le calcul du taux de boisement à travers une grille régulière est effectué. Cette dernière information sert de référence pour corriger, si nécessaire, les paramètres initiaux comme la taille de la maille (D), le rayon de recherche (R) ou les seuils dont dépend la classification des phytocénoses.

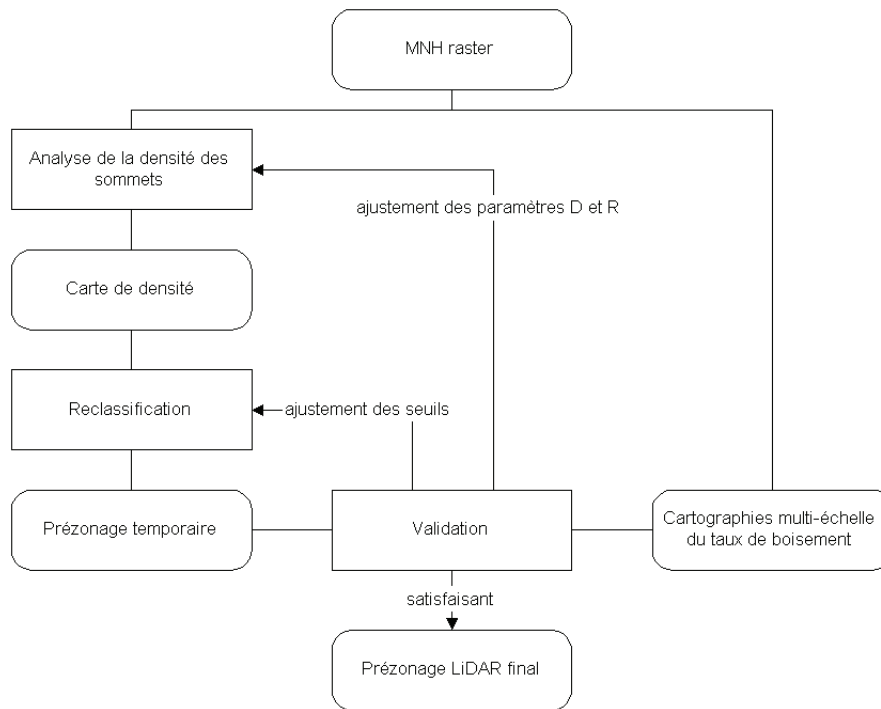


Figure 8.13. Méthodologie combinée adoptée sur le site de Mollens.

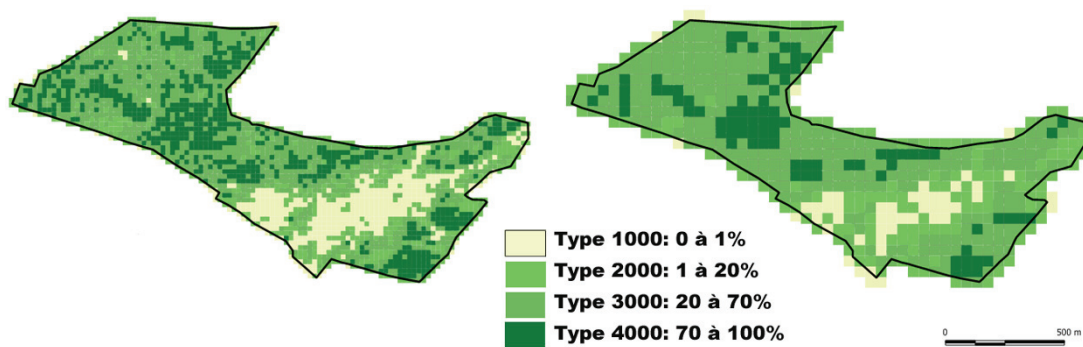


Figure 8.14. Cartographie du taux de boisement pour une grille régulière de 20 [m] (à gauche) et 45 [m] (à droite). Cette information est utilisée pour ajuster les paramètres de l'approche reposant sur une classification de la densité des sommets.

8.6.1. APPLICATION AU PÂTURAGE BOISÉ DU PRÉ DE MOLLENS

Dans un premier temps, les meilleurs paramètres obtenus sur le site de La Chaux ont été repris. Le calcul de densité a été réalisé avec une taille de la maille (D) de 10 [m] et un rayon de recherche (R) de 45 [m]. Les valeurs initiales de seuils, définies empiriquement pour le site de La Chaux (tableau 8.3) ont été ajustées afin de faire correspondre le plus judicieusement possible les limites de polygones avec les 4 classes cartographiées par la classification du taux de boisement à travers une grille régulière (tableau 8.4).

Phytocénoses	Densités [tige/km ²]
type 1000	0 - 0.002
type 2000	0.002 - 0.0065
type 3000	0.0065 - 0.0115
type 4000	> 0.0115

Tableau 8.4. Tableau de correspondance entre la densité des sommets et la classe de taux de boisement.

La grille résultante a été filtrée, afin d'éliminer les variations locales non significatives, puis vectorisée. Le taux de boisement a finalement été calculé pour chaque polygone sur la base des délimitations du boisé extraites du MNH. Cette dernière étape a pour objectif de valider la bonne cohérence finale du prézonage LiDAR. Le résultat est illustré par la figure 8.15.

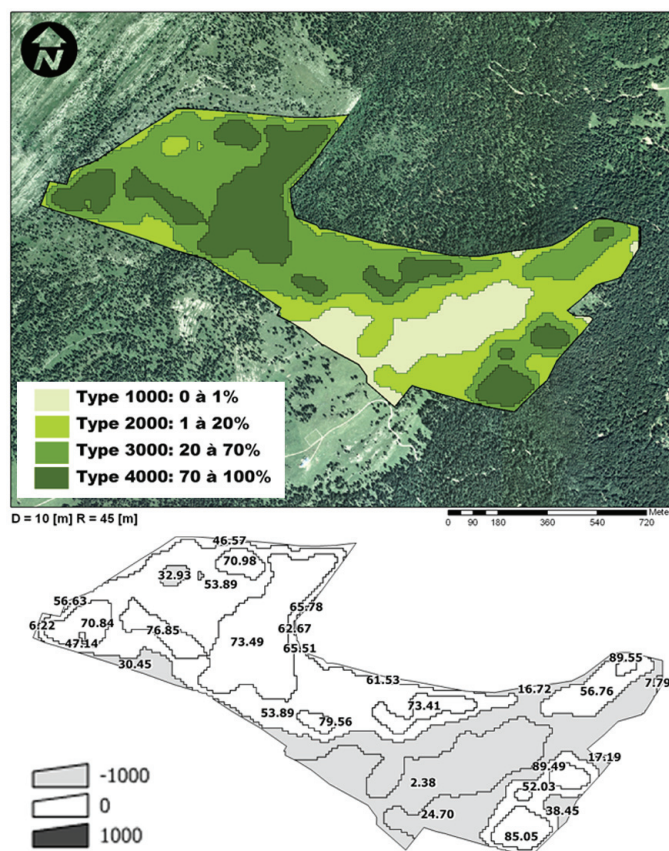


Figure 8.15. En haut, le résultat du prézonage automatisé sur le Pré de Mollens. La méthodologie est basée sur l'analyse de la densité des sommets ($D = 10$ [m]; $R = 45$ [m]). En bas, la carte illustrant les différences entre le type de phytocénose défini par la classification de la densité des sommets et le type déduit a posteriori du taux de boisement. Les chiffres correspondent aux taux de boisement (%) recalculés pour chacun des polygones. Source de données: Orthophoto SWISSIMAGE; © 1998 Office fédéral de topographie (www.swisstopo.ch).

Le résultat montre une bonne cohérence entre les types de phytocénoses définis par la méthodologie et le taux de boisement recalculé à l'intérieur de chacun des polygones. Les différences constatées concernent essentiellement les types 1000 et 2000, lorsque le taux de boisement est relativement proche d'une valeur seuil. Il existe néanmoins un polygone classifié en type 2000 alors que le taux de boisement recalculé est de 32.9%. Cette erreur peut s'expliquer par le fait qu'un faible décalage des contours, notamment par l'action du filtre modal, peut influencer notablement le taux de boisement sur les polygones ayant une petite surface.

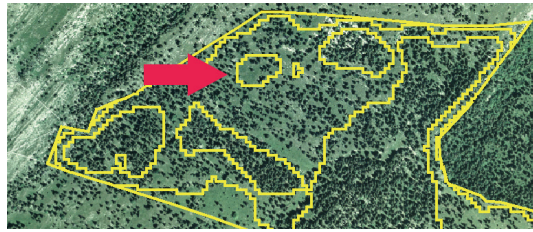


Figure 8.16. Illustration d'une délimitation en contradiction avec son taux de boisement recalculé.
Source de données: Orthophoto SWISSIMAGE; © 1998 Office fédéral de topographie (www.swisstopo.ch).

Dans un second temps, le résultat a été comparé avec un prézonage réalisé par une méthodologie traditionnelle (figure 8.17).

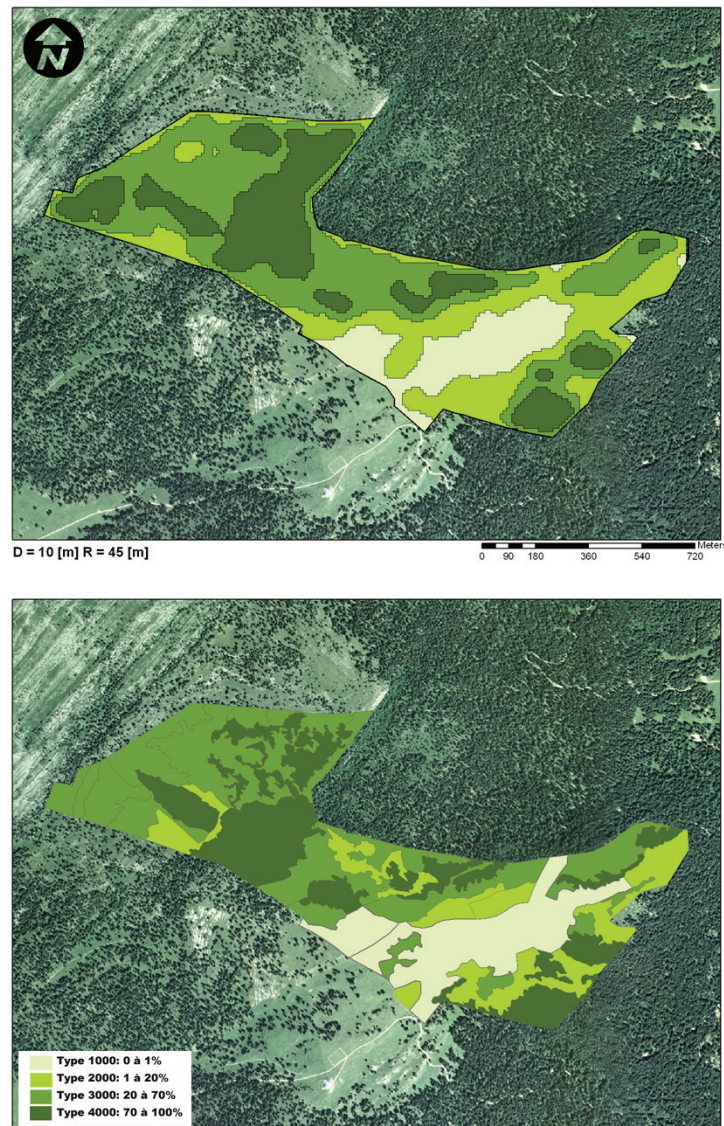


Figure 8.17. En haut, le résultat du prézonage automatisé sur le Pré de Mollens. La méthodologie est basée sur l'analyse de la densité des sommets ($D = 10$ [m]; $R = 45$ [m]). En bas, la carte du prézonage réalisée par un opérateur sur la base d'une photo-interprétation.
Source de données: Orthophoto SWISSIMAGE; © 1998 Office fédéral de topographie (www.swisstopo.ch).

La cohérence entre les prézonages issus de la méthodologie LiDAR et de la méthodologie traditionnelle

montre également un niveau de cohérence élevé. On constate néanmoins que les paramètres sélectionnés pour la classification des sommets semble généraliser un peu trop l'information, en comparaison au travail réalisé par l'opérateur. L'exercice a donc été complété afin de voir si une nouvelle classification permet d'affiner les délimitations. Deux nouvelles cartographies ont donc été réalisées avec des mailles de 10 [m] et 5 [m] et un rayon de recherche réduit à 20 [m] (figure 8.18). Ces nouveaux paramètres permettent d'apporter plus de nuances entre les types 2000 et 3000.

$D = 10 \text{ [m]} / R = 20 \text{ [m]}$

$D = 5 \text{ [m]} / R = 20 \text{ [m]}$

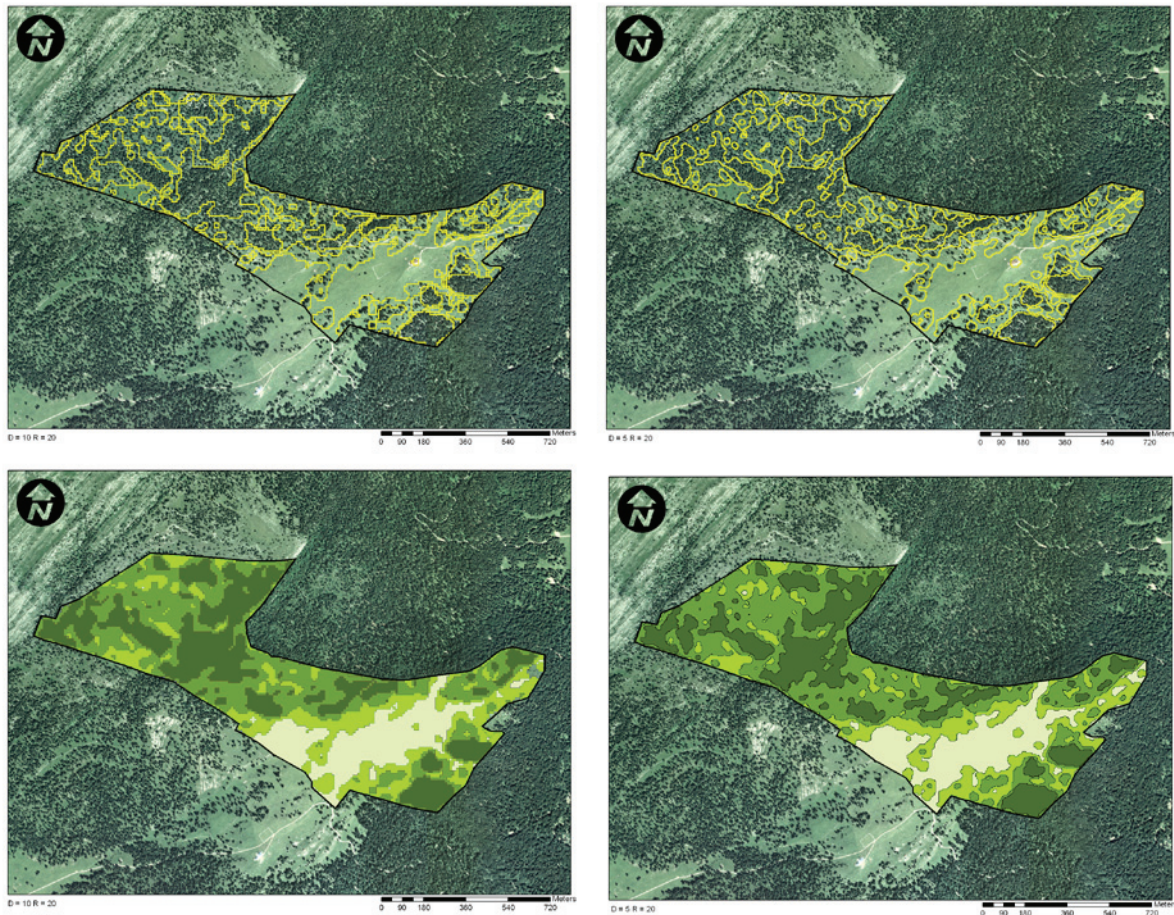


Figure 8.18. Résultat du prézonage automatisé sur le Pré de Mollens. La méthodologie est basée sur l'analyse de la densité des sommets: à gauche ($D = 10 \text{ [m]}$; $R = 20 \text{ [m]}$); à droite ($D = 5 \text{ [m]}$; $R = 20 \text{ [m]}$).

Source de données: Orthophoto SWISSIMAGE; © 1998 Office fédéral de topographie (www.swisstopo.ch).

8.7. SYNTHÈSE ET CONCLUSION

La méthodologie portant sur une classification de la densité des sommets (détectés par la méthode des maxima locaux), semble bien adaptée à la problématique du prézonage. Il est possible d'adapter les paramètres à la densité et à l'hétérogénéité du boisé. Même s'il existe un décalage entre la date de l'orthophoto (1998) et le modèle altimétrique LiDAR (2001), la cohérence de la délimitation des types de phytocénoses est bonne. L'information apportée par le calcul du taux de boisement à travers une grille régulière facilite un bon calibrage des paramètres en apportant une information de référence multi-échelle de la variation du taux de boisement sur le pâturage. Cette étape complexifie sensiblement les traitements mais se justifie par le fait qu'elle assure une meilleure reproductibilité de la méthodologie. Sans avoir la prétention de remplacer l'approche traditionnelle, qui combine une photo-interprétation et une étude sur le terrain, la méthodologie LiDAR doit se concevoir comme une aide qui offre un premier

prézonage objectif et robuste. En maintenant une certaine latitude grâce à l'ajustement des paramètres de calcul, la part de subjectivité reste tout de même faible. L'approche LiDAR permet encore de produire rapidement des délimitations de phytocénoses à plusieurs niveaux de détails et ainsi apporter à l'opérateur autant d'informations pour affiner le travail de photo-interprétation et finalement faciliter les investigations sur le terrain. La figure 8.19 démontre par exemple la possibilité d'adapter le choix du rayon de recherche à la résolution souhaitée du prézonage. Même si certaines corrections de délimitations restent nécessaires, notamment l'élimination des polygones de trop petites tailles, le prézonage LiDAR permet d'accélérer de manière significative le travail de prézonage.

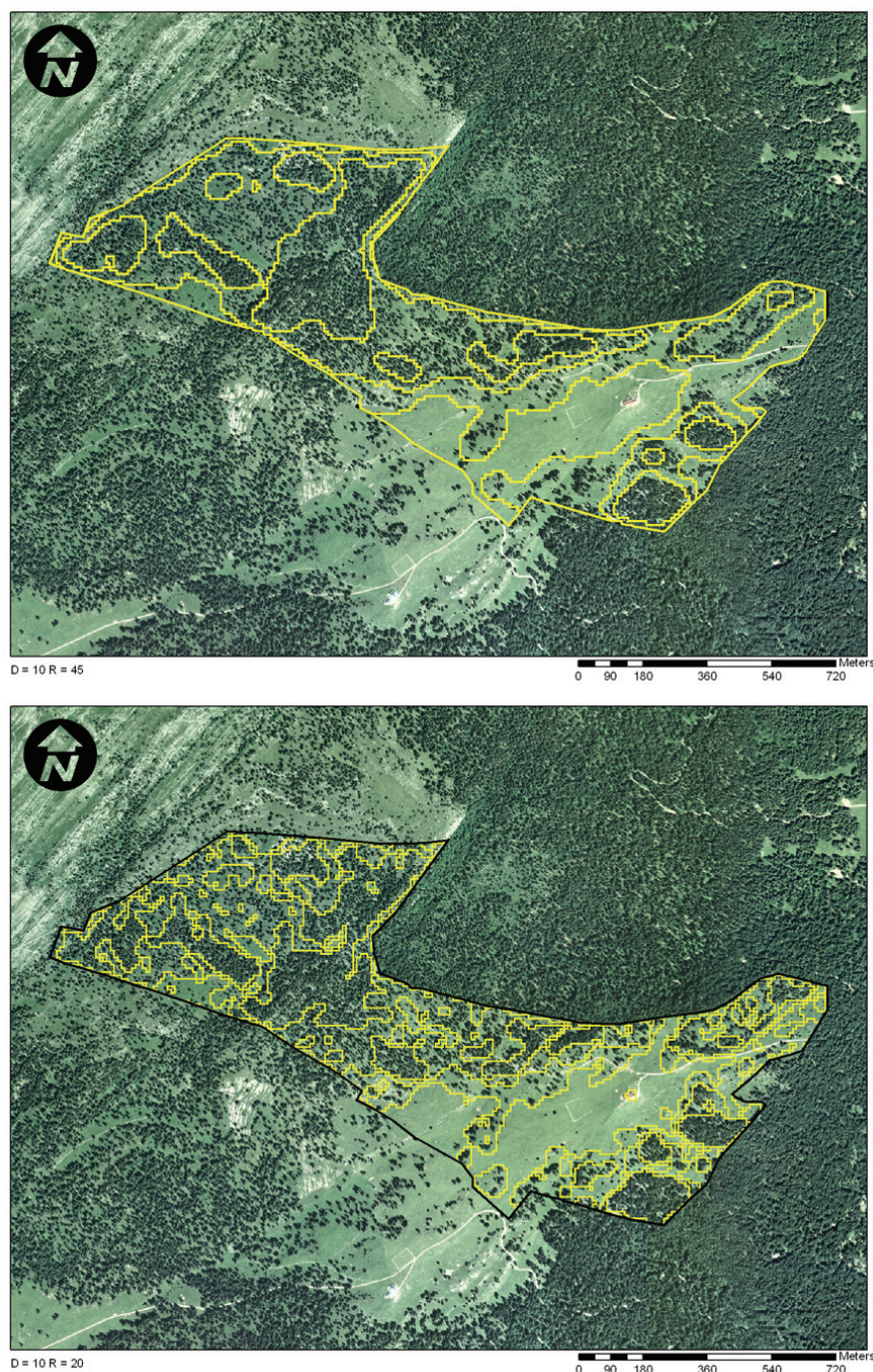


Figure 8.19. Comparaison entre les résultats du prézonage automatisé sur le Pré de Mollens. La méthodologie est basée sur l'analyse de la densité des sommets avec les paramètres $D = 10$ et $R = 45$ (en haut) et $D = 10$ et $R = 20$ (en bas).

Source de données: Orthophoto SWISSIMAGE; © 1998 Office fédéral de topographie (www.swisstopo.ch).

Pour rendre la méthodologie plus opérationnelle, il serait nécessaire de simplifier la phase de calibrage des seuils (correspondance entre la densité des sommets et la classe de taux de boisement) en définissant au préalable deux ou trois tableaux de correspondance adaptés à des distributions caractéristiques du boisé (classes d'hétérogénéité). Cette évolution nécessite de compléter la présente étude par l'analyse de nouveaux pâturages boisés.

ESTIMATION DU VOLUME SUR PIED

9.1. PROBLÉMATIQUE

- En théorie, le volume d'un arbre se calcule en fonction de sa hauteur et de son diamètre à hauteur de poitrine d'après la fonction (Société vaudoise de sylviculture, 2006):

$$V = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot H \cdot F \quad (9.1)$$

V = volume, D = diamètre, H = hauteur, F = facteur de réduction qui dépend de la forme, elle-même dépendante de l'essence et de l'âge de la station.

Dans la pratique, l'utilisation d'une telle fonction serait bien trop contraignante à mettre en place. Par souci de simplicité et d'uniformité, la détermination du volume sur pied se base sur un tarif conventionnel unique (tarif d'aménagement), qui fait correspondre un volume à chaque catégorie de diamètre mesuré.

Ce tarif est valable pour toutes les situations et toutes les essences (figure 9.1). Dans la pratique, il est cependant possible de trouver des tarifs adaptés au type de station (plaine, moyenne et haute montagne). Les volumes s'expriment en [m³] ou en sylve [sv]¹. Cette dernière unité peut être utilisée pour l'aménagement des forêts, la tenue des contrôles d'aménagement et les calculs d'accroissement. Le volume indiqué dans ces tables s'entend écorce et branches comprises.

1. Un sylve correspond à 1 [m³] tarif ou encore 1 [m³] sur pied.

Catégorie	Cube [sv]	Classe	Catégorie	Cube [sv]	Classe
20	0.27	Petit bois	55	2.99	Gros bois
25	0.45	Petit bois	60	3.6	Gros bois
30	0.69	Petit bois	65	4.26	Gros bois
35	1.02	Bois Moyens	70	4.95	Gros bois
40	1.43	Bois Moyens	75	5.68	Gros bois
45	1.9	Bois Moyens	80	6.44	Gros bois
50	2.42	Bois Moyens	85	7.22	Gros bois

Figure 9.1. Exemple du tarif d'aménagement unique pour le canton de Neuchâtel.

La connaissance du volume de bois à l'échelle d'un peuplement, d'une division ou d'une région est une donnée capitale pour la planification. La différence de volume sur pied des inventaires successifs, augmentée des bois exploités dans l'intervalle permet de connaître l'accroissement, notion déterminante pour orienter les futurs prélèvements:

$$\text{Accroissement} = \text{Différence de stock} + \text{Volume exploité}$$

La gestion d'une forêt suppose une connaissance approfondie de celle-ci. Le plan de gestion est basé sur le principe du rendement soutenu, de sorte qu'il est nécessaire de connaître, d'une part, le volume sur pied et la distribution des classes de diamètres dominants par un inventaire forestier, et, d'autre part, les volumes exploités. De ces deux informations, on déduit la quantité exploitable (Possibilité¹).

Deux approches s'opposent en ce qui concerne les tâches d'inventaire périodique et le calcul de l'accroissement: l'inventaire «pied par pied» ou «dénombrement intégral» et l'inventaire par échantillonnage. Chacune des deux approches présentent des avantages et des désavantages, l'une et l'autre produisent des résultats affectés d'une incertitude. Il ne faut donc pas attendre de la comparaison de plusieurs inventaires successifs une estimation sûre de l'accroissement, mais plutôt une expression globale de la forêt. L'analyse comparative des inventaires porte donc avant tout sur la compréhension des tendances générales dans l'évolution de la structure et la composition des peuplements. Le complément d'information sur les deux types d'inventaire présentés ci-après se base essentiellement sur la démarche helvétique considérée pour cette étude.

9.1.1. L'INVENTAIRE «PIED PAR PIED»

L'inventaire «pied par pied», que seul le canton de Neuchâtel pratique de manière systématique en Suisse, assure une délimitation et une description des peuplements présents sur l'ensemble des unités de gestion. Les limites de ces unités, d'une surface moyenne de 3 à 10 [ha], sont fixées initialement dans le terrain de manière à ne permettre ni doute, ni hésitation.

1. Montant de l'exploitation annuelle de coupe à rendement soutenu, sanctionnée par le plan de gestion.

L'inventaire est intégral, c'est-à-dire qu'il recense par unité de gestion, tous les arbres ayant un diamètre à hauteur de poitrine (dhp) supérieur au seuil d'inventaire fixé (par exemple 17.5 [cm] pour le canton de Neuchâtel), par catégorie de grosseur (pour garder le même exemple, les intervalles sont de 5 [cm] pour le canton de Neuchâtel) et par essences. Les opérateurs se déplacent en se décalant les uns par rapport aux autres. Les tiges sont mesurées à 1.30 [m] du côté amont de la pente, puis marquées à la craie grasse du côté des autres opérateurs. Des capteurs électroniques (comme par exemple les modèles DATAFOX 2000 ou PSION) sont généralement utilisés afin de faciliter l'acquisition des mesures durant la phase d'inventaire.



Figure 9.2. Inventaire «pied par pied» à l'exemple du canton de Neuchâtel. A gauche, mesure du dhp avec un compas de forestier. Au centre, marque à la craie sur un arbre inventorié. A droite, capteur électronique PSION.

Une fois télédéchargées sur ordinateur, ces données permettent de calculer automatiquement un rapport d'inventaire qui comprend:

- Des statistiques à l'hectare:
 - Nombre de tiges
 - Matériel [sv]
 - Tige moyenne [sv]
 - Pourcentage de petit, moyen et gros bois
- Des statistiques en fonction des espèces:
 - Volume par essence [%]
 - Nombre de tiges [%]

Les inventaires, sur lesquels s'appuient les révisions des plans de gestion, sont méthodiques et répétés; ils se succèdent pour un même propriétaire à intervalles variant de 10 à 25 ans au maximum.

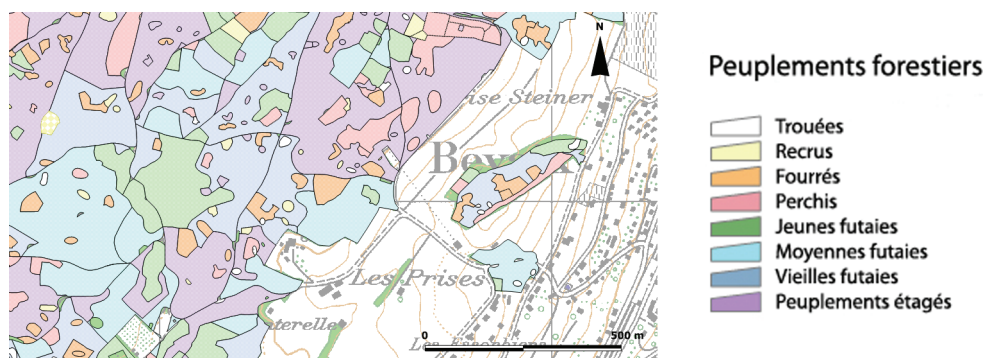


Figure 9.3. Cartographie des peuplements issue d'un inventaire «pied par pied» à l'exemple du canton de Neuchâtel.

CP25 © 2001 swisstopo (www.swisstopo.ch).

9.1.2. L'INVENTAIRE PAR ÉCHANTILLONNAGE

L'inventaire forestier par échantillonnage est pratiqué dans la grande majorité des cas. Il remplace avantageusement le dénombrement pied par pied, mais exige toutefois beaucoup plus d'attention, de précision et d'objectivité de la part de son exécutant (SFFN, 1994). Il se réalise sur un réseau de placettes d'environ 11 à 12 [m] de rayon en moyenne (4 [ares]) chacun. A l'intérieur de celles-ci, tous les arbres dont le diamètre est supérieur à un seuil d'inventaire donné (par exemple: 17.5 [cm] pour le canton de Neuchâtel ou 16 [cm] pour le canton de Genève) sont mesurés. Les sources d'erreurs mentionnées relatives à cette approche sont: le choix d'un rayon non représentatif, l'absence d'identification d'arbres-limite, l'oubli ou la mesure à double des tiges, les imprécisions dans la mesure des diamètres (position, hauteur, orientation du compas, etc.).

Ce mode d'inventaire est relativement rapide. On estime qu'un opérateur est en mesure de réaliser en moyenne 2 à 4 placettes par heure (2 à 4 [ha]) selon la difficulté du terrain. L'inventaire «pied par pied», plus coûteux en temps, nécessiterait une journée de travail pour une même surface. Les conditions vaudoises stipulent que dans 90% des cas, le volume calculé se situe à l'intérieur d'une marge d'erreur délimitée de chaque côté par un pourcentage de la valeur calculée que l'on nomme l'erreur à craindre. Elle s'exprime en % du matériel sur pied ou du nombre de tiges et dépend elle-même du degré d'homogénéité ou d'hétérogénéité des peuplements composant une unité à inventorier.

Le degré de précision des résultats d'inventaire pour une série d'aménagements ou d'une propriété dépend directement de la densité d'échantillonnage et de l'homogénéité des peuplements délimités ou statiques. En général, pour les propriétés supérieures à 50 [ha], les placettes sont localisées sur une grille régulière carrée de 100 [m] de côté, à raison d'une placette par [ha], y compris les pâturages boisés. Pour les massifs forestiers de 10 à 49 [ha], on adopte 2 [placettes/ha], voire dans certains cas, 4 [placettes/ha]. En dessous de 10 [ha], seul l'inventaire intégral est assez précis.

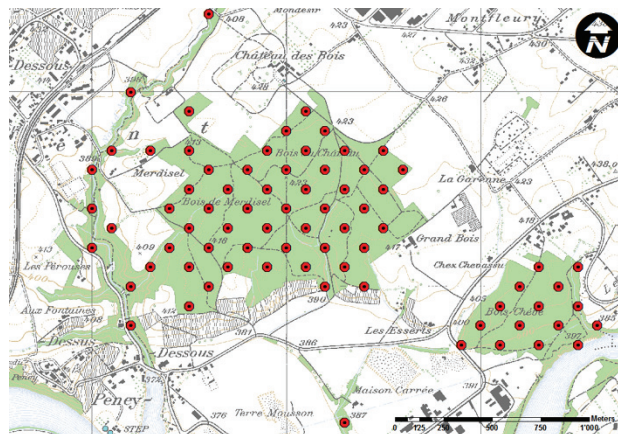


Figure 9.4. Disposition des placettes d'échantillonnage (cercles) sur un secteur forestier du canton de Genève. Pour chacune d'elles est enregistrée une série d'informations (attributs) comme le volume sur pied, le diamètre dominant, la proportion entre petit, moyen et gros bois, ou encore des informations relatives au mélange des essences présentes. CP25 © 2001 swisstopo (www.swisstopo.ch).

Choix du rayon de la placette

Le choix des rayons s'inscrit à l'intérieur d'une plage bien délimitée, caractérisée en son centre de gravité, par un rayon médian. Suivant les peuplements, les conditions de station, le problème posé ou l'objectif recherché, on opte pour l'une des trois variantes décrites ci-dessous:

- **La variante normale** convient à toutes les forêts (sauf aux forêts clairiérées, aux bois sur pâturage et à la ligniculture). Pour les terrains dont la pente est inférieure à 30°, le rayon varie de 9 à 12 [m] avec un rayon médian de 11 [m]. Pour avoir la même surface de placette en ares sur des terrains dont

la pente est supérieure à 30°, la variante normale passera de 10 à 13 avec un rayon médian de 12 [m].

- **La variante bois sur pâturage** propose des rayons variant de 13 à 15 [m] avec un rayon médian de 14 [m].

La variante ligniculture, qui convient aux cultures de peupliers et autres essences à croissance rapide, propose un rayon fixe de 15 [m].

La recherche développée dans ce chapitre a pour objectif d'évaluer une méthode simple pour estimer le volume de bois à partir des données LiDAR. La démarche repose sur une approche à l'échelle de l'arbre, comparable à la méthode d'inventaire pied par pied réalisée sur le canton de Neuchâtel. Un volume de bois est calculé individuellement pour chaque sommet localisé. Le volume à l'échelle d'un peuplement, d'une division ou encore d'un massif est ensuite estimé en sommant les volumes individuels. Sur le plan empirique, et comme cela a été démontré dans le chapitre 4 consacré en partie à la localisation des arbres par la méthode des maxima locaux, il est impossible de dénombrer correctement toutes les tiges à partir d'un point de vue aéroporté, autant par traitement automatisé que par analyse visuelle. De plus, la prédiction du volume d'une tige par sa hauteur demeure relativement incertaine. On s'attend donc d'emblée à des résultats entachés d'erreur qui débouchent sur une sous-estimation systématique du volume. Le travail présenté dans ce chapitre se justifie néanmoins pour deux raisons. Tout d'abord, il présente les limites relatives à l'élaboration d'un tarif de cubage LiDAR unique, mettant en relation les hauteurs LiDAR au volume de bois. Un tel tarif, qui s'applique invariablement pour tous les types de couvert forestiers en futaie, présente l'avantage d'être extrêmement facile à utiliser, même s'il induit une approximation certaine du fait qu'il s'applique à toutes les espèces d'arbres, feuillus et résineux confondus. Défini en 1920 par H. Biolley, le tarif de cubage unique pour le canton de Neuchâtel continue d'être utilisé de nos jours pour la gestion opérationnelle de la production de bois. Ensuite, la comparaison des volumes estimés par LiDAR avec les volumes dérivés de méthodes traditionnelles d'inventaire permet d'analyser les écarts pour les trois grandes classes de diamètres: petits bois (dhp entre 20 et 30 [cm]), bois moyens (dhp entre 35 et 50 [cm]) et gros bois (dhp supérieur 55 [cm]). Ceci permet notamment d'évaluer plus finement l'influence de la structure du couvert sur la précision de l'estimation.

Deux modes d'inventaire sont considérés à travers deux cas d'étude bien distincts. Le premier, situé sur le canton de Neuchâtel, repose sur l'analyse de deux secteurs forestiers d'environ un hectare spécialement délimités pour l'exercice et sur lesquels a été réalisé un inventaire pied par pied. Les données de terrain, précises et uniformes sur l'hectare, permettent ainsi d'apprécier les limites de la méthodologie LiDAR proposée. Le second cas d'étude, localisé sur la canton de Genève, a la particularité d'être couvert par un inventaire par échantillonnage. Il s'agira ainsi de confronter une méthodologie couvrante, basée sur le LiDAR, avec l'approche statistique en vigueur. Une attention toute particulière est portée sur l'incidence de la structure verticale de la forêt sur le résultat.

9.2. ETAT DE L'ART DANS LE DOMAINE DU LiDAR

Les premières recherches détaillées touchant au calcul du volume forestier sur la base de données LiDAR remontent aux années 80 (Nelson et al., 1984; Nilsson, 1996). Ces études, réalisées avec des profilomètres (sans système de balayage des impulsions laser), ont déjà pu démontrer le potentiel opérationnel des données LiDAR pour l'estimation de la biomasse et du volume forestier lorsque l'on dispose de données terrain pour le calibrage. Erik Naesset a approfondi la recherche liée au volume en évaluant la précision de l'estimation du volume forestier par un LiDAR à balayage (Naesset, 1997). Il prend notamment en compte l'influence du type de couvert en place et l'angle de scannage sur l'erreur de calcul. Les résultats de son étude indiquent que le type et la structure de la forêt étudiée sont des facteurs déterminants pour l'estimation du volume sur la base des données LiDAR. L'analyse suggère même qu'il serait nécessaire de calibrer les équations pour le calcul du volume en tenant compte des essences et de la stratification du couvert.

Hyypä et al. (2001a) ont estimé le volume des troncs pour chaque arbre détecté individuellement par une fonction ayant comme variable la hauteur et le diamètre à hauteur de poitrine. Les travaux portent sur plusieurs sites tests d'une surface moyenne de 1.2 [ha], qui ont permis d'estimer le volume de bois avec une erreur standard de 10.5% sur la moyenne.

Persson et al. (2002) ont estimé, sur la base de la hauteur LiDAR et des diamètres de couronnes, le diamètre à hauteur de poitrine. L'erreur est certes supérieure aux techniques de terrain, mais reste acceptable (10% de la valeur moyenne). Dans cette même étude, alors que seuls 71% de l'ensemble des arbres ($d_{hp} \geq 5$ cm) ont pu être détectés, 91% du volume de bois a été estimé. Ceci tient au fait que les grandes tiges formant le toit de la canopée, et donc plus facilement détectées sur le modèle LiDAR, ont un poids déterminant dans le calcul du volume. Dans l'exemple présenté, 90 à 100% du volume de bois a pu être décelé.

Une récente étude réalisée en Finlande a testé plusieurs indices relatifs au volume forestier. Cette même étude a également montré que la diminution de la densité de points bruts LiDAR (de 12.7 [pts/m²] à 0.13 [pts/m²]) n'a pas d'influence significative sur la précision de l'estimation du volume de bois (Maltamo et al., 2006a et b).

9.3. SITES ET SOURCES DE DONNÉES

9.3.1. SECTEURS D'INVENTAIRES SUR LE CANTON DE NEUCHÂTEL

Cette étude repose sur l'analyse de deux sites forestiers. Le premier se compose de deux secteurs, d'environ un hectare chacun, situés dans les forêts communales de Bevaix et Cortaillod (Neuchâtel). Un inventaire pied par pied, réalisé en février 2006, a permis de relever notamment l'essence et le dhp (au compas forestier) pour les tiges dont le diamètre est supérieur à 17.5 [cm] (seuil d'inventaire pour le canton de Neuchâtel). Selon la cartographie des peuplements, mise à jour en 2006, les deux secteurs appartiennent majoritairement à de la vieille futaie. Les arbres dont le dhp est supérieur à 50 [cm] sont nombreux et l'introduction de rajeunissement est assez fréquente.

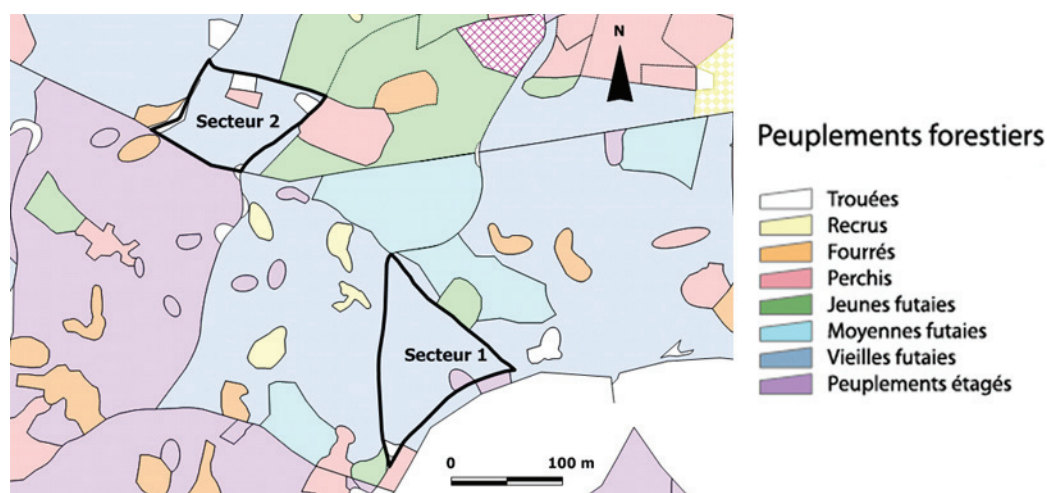


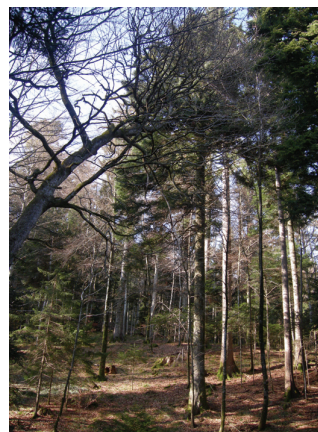
Figure 9.5. Description des deux secteurs neuchâtelois sur la base de l'inventaire de terrain réalisé en février 2006.

Secteur 1 - Commune de Bevaix



Surface: 0.99 [ha] **Petit bois:** 24.3% du volume
Tiges à l'hectare: 268 **Bois moyen:** 65.2% du volume
Tige moyenne: 0.96 [sv] **Gros bois:** 10.4% du volume

Secteur 2 - Commune de Cortaillod



Surface: 0.80 [ha] **Petit bois:** 11.9% du volume
Tiges à l'hectare: 241 **Bois moyen:** 25.0% du volume
Tige moyenne: 1.79 [sv] **Gros bois:** 63.2% du volume

Figure 9.5. Description des deux secteurs neuchâtelois sur la base de l'inventaire de terrain réalisé en février 2006.

9.3.2. SECTEUR DU BOIS DE JUSSY

Le second site correspond à une parcelle de 200 [ha] dans le bois de Jussy (canton de Genève). Il se compose essentiellement d'un mélange de chênaie à gouet et de chênaie à molinie. Les travaux visibles dans la forêt de Jussy sont la régénération de la chênaie et la conversion des taillis en pseudo-futaie. La chênaie à molinie est un peuplement forestier plutôt clairsemé. L'abondance de lumière au sol est d'ailleurs l'une de ses caractéristiques. Cela permet à un grand nombre de plantes de pousser en sous-bois car elles n'ont pas de problème de lumière (Werdenberg & Hainard, 2000). La chênaie à gouet (ou chênaie mésophile) est une forêt plus sombre. La lumière au sol étant de l'ordre de 5% de la lumière incidente, contre environ 15% de la chênaie à molinie. C'est aussi une forêt dont la physionomie est beaucoup moins régulière que celle de la chênaie à molinie. La taille des arbres est beaucoup plus variable d'un lieu à l'autre, ce qui contraste avec la physionomie relativement uniforme de la chênaie à molinie (Werdenberg & Hainard, 2000). Un inventaire par échantillonnage, réalisé en 2004, sert de référence pour l'étude du matériel en place. Les placettes circulaires, distribuées en quinconce, ont un rayon moyen de 11 [m] et une distance de 200 [m] les sépare latéralement. Les données suivantes ont notamment été relevées lors de l'inventaire: le diamètre dominant, le nombre de tiges par hectare ayant un diamètre supérieur à 16 [cm] (seuil d'inventaire pour le canton de Genève), le volume total par hectare, le volume total des petit, moyen et gros bois, ainsi que le volume par hectare en fonction des essences (feuillus ou résineux).

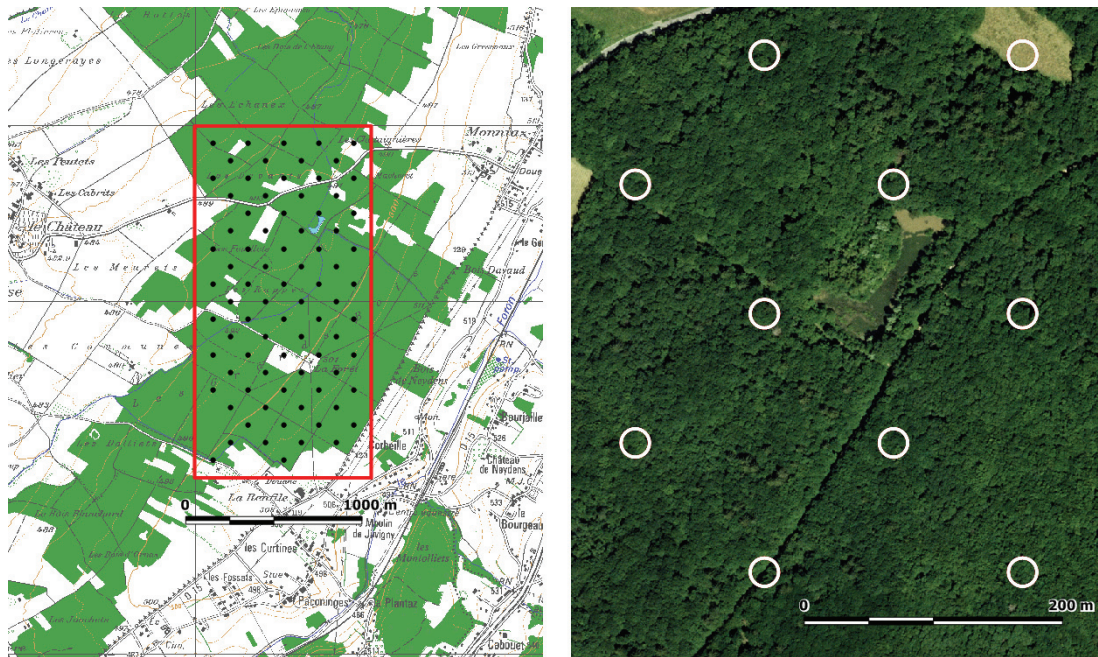


Figure 9.6. A gauche, le secteur de 200 [ha] (grand rectangle) sur le bois de Jussy. Les points noirs correspondent aux 81 placettes considérées pour cette étude. A droite, un agrandissement sur le secteur, afin d'illustrer l'emprise des placettes d'échantillonnage de 11 [m] de diamètre (cercles) sur la forêt.

CP25 © 2001 swisstopo (www.swisstopo.ch). Orthophoto: © SITG (www.SITG.ch).

Le tableau 9.1 résume les propriétés des données d'inventaire sur les sites d'étude traités.

	Type d'inventaire	Seuil d'inventaire	Date d'inventaire
Secteur 1 (Bevaix) Secteur 2 (Cortailod)	pied par pied	dhp \geq 17.5 [cm]	2006
Bois de Jussy	par échantillonnage	dhp \geq 16 [cm]	2004

Tableau 9.1. Propriétés des données d'inventaire.

9.3.3. DONNÉES LiDAR ET ORTHOPHOTOS

Dans cette étude, les orthophotos ont pour seuls objectifs de permettre une localisation plus précise de l'emplacement des placettes et offrir une vision plus explicite du toit de la forêt. C'est également une source intéressante pour se faire une idée du degré de couverture ou du mélange.

Le site de Neuchâtel, en plus de la couverture cantonale réalisée en 2006 avec une caméra numérique (Riedo, 2007), dispose de l'orthophoto issue de la campagne d'acquisition Scan2map. Calculée avec le MNT Scan2map, cette image couleur bénéficie d'une résolution spatiale de 10 [cm]. Elle a servi de référence pour une première validation de la densité et de la localisation des sommets. Pour le bois de Jussy, une orthophoto de 16 [cm] de résolution spatiale en couleur et fausse-couleur est à disposition. Comme pour le site neuchâtelois, aucun traitement d'image n'a été effectué.

En matière de couverture LiDAR, les secteurs de Bevaix et Cortailod bénéficient de deux jeux de données: le premier issu des vols ALTMS de janvier/février 2001 et octobre 2002 et le second du vol Scan2map du 30 juin 2005. Etant donné que la méthodologie repose sur une approche à l'échelle de l'arbre, il est important que la date d'acquisition LiDAR soit aussi proche que possible de la période de l'inventaire qui fait office de référence. La densité des mesures est également une caractéristique importante.

Plus la densité est élevée, meilleure sera la modélisation de la cime des arbres. Pour ces raisons, les données Scan2map ont été privilégiées pour cette étude. Les données LiDAR sur le bois de Jussy proviennent d'une série de vols qui se déroulèrent en 2005 à l'aide d'un système Optech ALTM 3100. Ce dernier est apte à l'enregistrement de plusieurs retours (jusqu'à 4) pour une impulsion. Les caractéristiques des missions de vol ont permis d'obtenir une densité de points bruts souvent supérieure à 10 [pts/m²] en forêt. Le tableau 9.2 résume les données de télédétection à disposition ainsi que leurs dates d'acquisition pour les sites traités.

Site	Données LiDAR ^a				Données photographiques (orthophotos RGB)		
	Système	Date du vol	Densité moyenne [pts/m ²]	Enregistrement des échos	Caméra	Date du vol	Résolution spatiale
Bevaix secteur 1	Scan2map	juin 2005	4	Alternatif ^b	DMC	juin 2006	25 [cm]
					Hasselblad H1	juin 2005	10 [cm]
Cortailod secteur 2	Scan2map	juin 2005	4	Alternatif	DMC	juin 2006	25 [cm]
					Hasselblad H1	juin 2005	10 [cm]
Bois de Jussy	ALTM 3100	mars 2005	12	4 retours ^c	UltraCam (Vexcel)	août 2005	16 [cm] & 25 [cm]

Tableau 9.2. Tableau résumé des données de télédétection utilisées pour l'étude consacrée au calcul du volume sur pied.

- Les données techniques spécifiques aux systèmes LiDAR, ainsi que les paramètres des missions de vol, sont exposés au chapitre 3 «Source et nature des données LiDAR».
- Un seul retour est enregistré pour une impulsion donnée. Le mode alternatif consiste à enregistrer alternativement le premier et le dernier écho.
- Le système ALTM 3100 permet l'enregistrement maximum de 4 retours par impulsion. Les échos sont finalement marqués comme appartenant à l'une des 4 classes suivantes: «single return», «first of many», «intermediate» et «last of many».

9.4. ESTIMATION DU VOLUME SUR PIED

La méthodologie proposée repose sur une démarche proche des méthodes courantes d'inventaire. Le calcul du volume total de bois passe par l'attribution d'un volume de bois individuel, pour chaque arbre détecté, sur la base d'un tarif de cubage unique. Pratiquement, la procédure se déroule en trois phases distinctes:

Phase 1: la détection des sommets par la méthode des maxima locaux.

Phase 2: l'élaboration d'un tarif d'aménagement qui établit la relation entre une hauteur LiDAR et le dhp.

Phase 3: le calcul du volume total de bois, sachant que ce volume, pour un peuplement ou une division forestière donnée, est la somme des volumes calculés pour chaque arbre détecté à l'intérieur de la surface considérée.

Les trois phases et leurs interactions sont illustrées par la figure 9.7. La validation des résultats repose sur une comparaison des volumes estimés par LiDAR avec les données collectées par des méthodes d'inventaire de terrain traditionnelles.

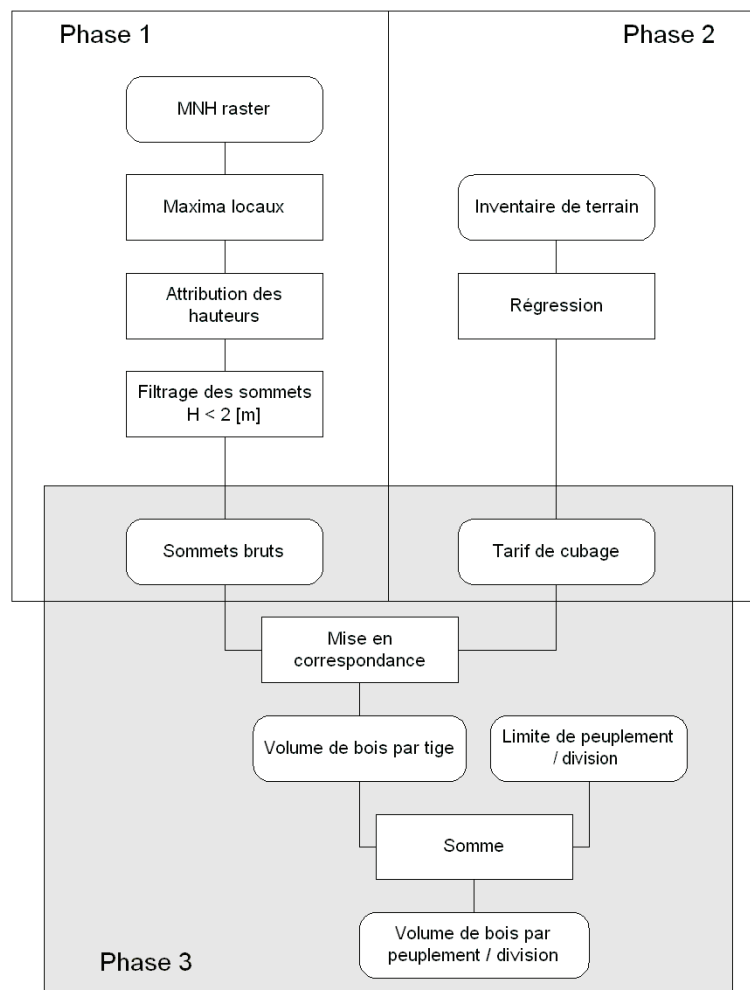


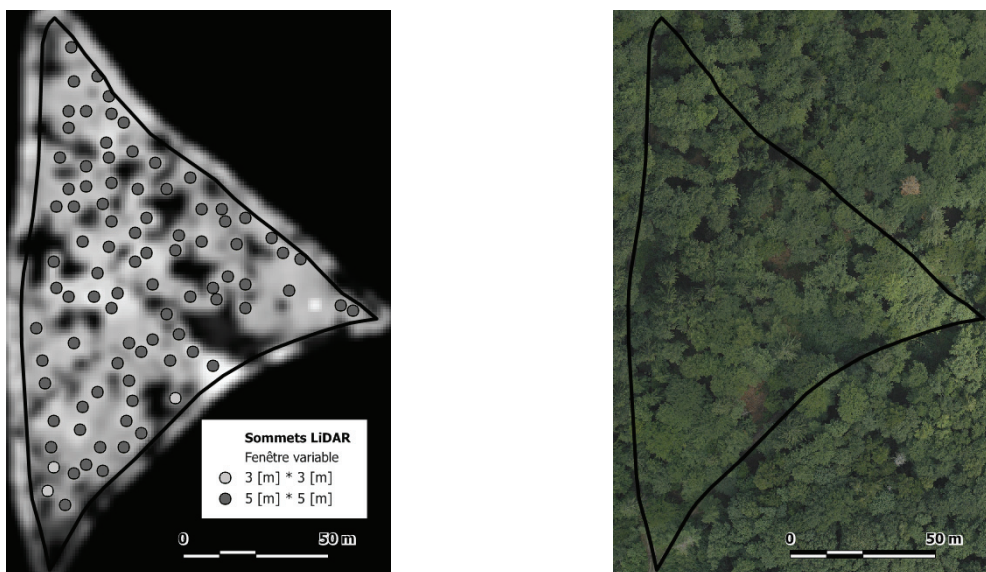
Figure 9.7. Les 3 phases de la méthodologie mise en place pour le calcul du volume sur pied.

9.4.1. LOCALISATION DES SOMMETS ET ESTIMATION DES HAUTEURS

Le calcul des sommets et l'attribution de leurs hauteurs respectives se base sur les méthodologies développées dans le chapitre 4 (Détermination de caractéristiques élémentaires à l'échelle de l'arbre). Les choix de la résolution spatiale et de la méthode d'interpolation du MNH raster reposent sur l'analyse détaillée dans le chapitre 4. Les paramètres retenus sont une résolution spatiale d'un mètre et une interpolation TIN réalisée dans l'application TerraScan. Dans la mesure où les sites étudiés se composent de peuplements dominés par les feuillus, un filtre gaussien a été utilisé pour lisser les irrégularités du MNH tout en conservant le plus fidèlement possible la structure des houppiers¹. L'algorithme des maxima locaux implémentant une fenêtre d'analyse de taille variable a été utilisé afin de favoriser la détection des petits individus, et ainsi révéler le mieux possible les structures ayant des hauteurs de tiges variables. Le résultat de la localisation des sommets pour les 2 sites traités sur les forêts communales de Bevaix et Cortailod est illustré par la figure 9.8.

1. Partie supérieure de la frondaison.

Secteur 1 (Bevaix)



Secteur 2 (Cortailod)

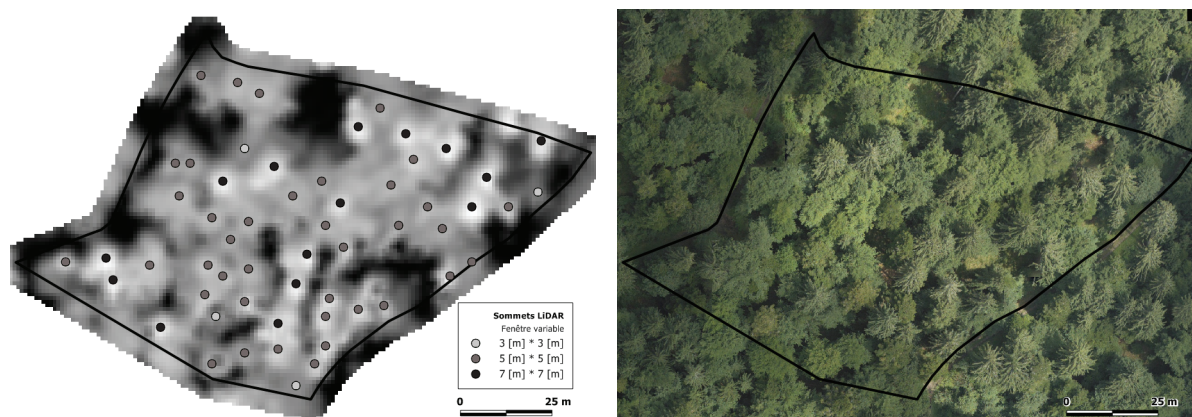


Figure 9.8. Illustration permettant la comparaison entre la localisation des sommets LiDAR sur le MNH (à gauche) et une vue générale de la végétation en place grâce à l'orthophoto (à droite) pour les 2 sites étudiés sur les forêts communales de Bevaix et Cortailod. © SITN (www.ne.ch/sitn).

La figure 9.9 donne un aperçu de la délimitation des sommets sélectionnés sur une placette d'échantillonnage du bois de Jussy.

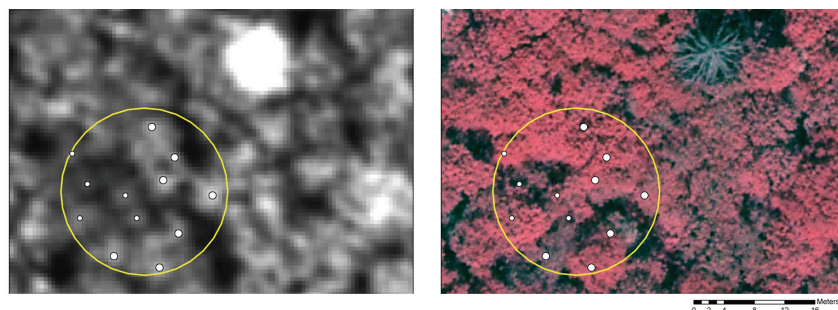


Figure 9.9. A gauche, illustration permettant d'apprécier la localisation des sommets LiDAR (points blancs) sur une placette d'échantillonnage (grand cercle). Les sommets détectés par une fenêtre mobile de $5 \times 5 [m^2]$ sont représentés par des cercles plus gros que les sommets issus d'une fenêtre $3 \times 3 [m^2]$. En fond de plan, se trouve le MNH. A droite, la même information avec l'orthophoto fausse-couleur en fond de plan. Source de données: © SITG (www.SITG.ch).

9.4.2. RELATION HAUTEUR-DIAMÈTRE À HAUTEUR DE POITRINE

La relation entre la hauteur d'un arbre et son diamètre à hauteur de poitrine a été déterminée par l'analyse d'un échantillon de 30 arbres caractéristiques sélectionnés sur quatre peuplements d'âges différents: 12 perchis, 4 arbres en jeune futaie, 6 arbres en futaie moyenne et 8 arbres en vieille futaie. Les dhp ont été relevés au compas forestier à 1.30 [m] au-dessus du niveau du sol. De manière systématique, une seule mesure est faite, en se positionnant en amont de l'arbre, face à la pente. Concernant cette mesure, il est important de mentionner que la valeur est arrondie selon des classes s'échelonnant tous les 5 [cm] pour le canton de Neuchâtel, alors que le canton de Genève base son tarif d'aménagement sur des classes arrondies au centimètre.

Les hauteurs d'arbre ont été mesurées au tachéomètre selon le schéma exposé à la figure 9.10. La précision des mesures de hauteur est estimée à 1 [m].

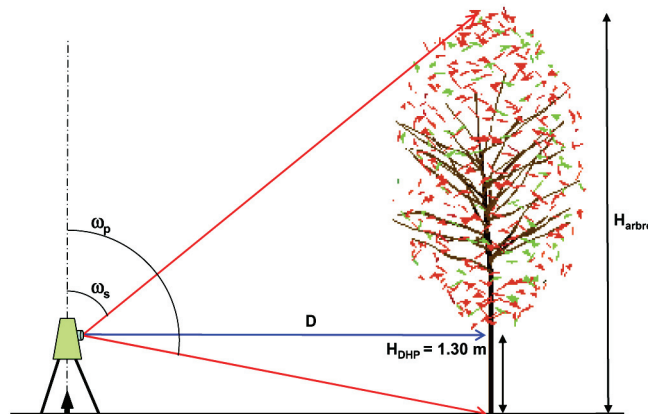
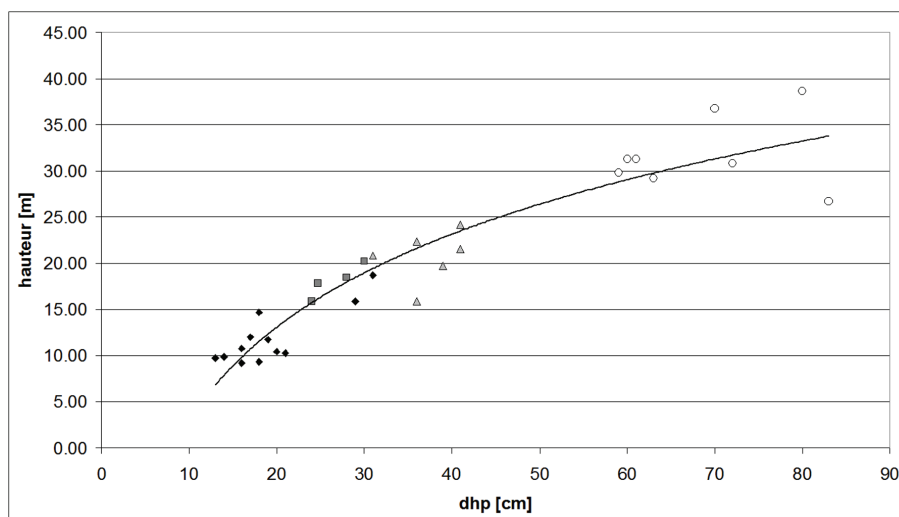


Figure 9.10. Schéma de la mesure des hauteurs d'arbre au tachéomètre.

Une régression entre les hauteurs et les dhp a permis d'estimer une fonction pour la prédiction des dhp à partir des hauteur LiDAR. Les résultats de la régression sont illustrés par la figure 9.11.



$$h = a \cdot \ln(dhp) + b \quad R^2 = 0.89 \quad (9.2)$$

$$a = 14.543, b = -30.492$$

Figure 9.11. Régression logarithmique entre la hauteur et le diamètre à hauteur de poitrine. Les losanges correspondent au secteur de perchis, les carrés aux arbres en jeune futaie, les triangles à la futaie moyenne et finalement les arbres en vieille futaie sont représentés par les cercles.

Afin de déterminer si la corrélation est significative ou non, le coefficient de corrélation de Pearson a été calculé. Il mesure le niveau de relation linéaire entre les deux variables. La valeur obtenue de 0.936 atteste de la bonne corrélation et prouve que le risque de se tromper en rejetant l'hypothèse nulle selon laquelle les corrélations ne sont pas différentes de zéro est inférieure à 5%.

Le choix d'une fonction logarithmique¹ pour la régression tient au fait que les jeunes arbres ont une croissance plus rapide (pente de la courbe plus élevée) que les arbres plus âgés (pente de la courbe relativement plate). L'alternative d'une fonction polynômiale du 2ème degré a également été évaluée. Cette option n'a cependant pas été retenue, car peu adaptée à l'estimation des dhp supérieurs au dhp maximal de l'échantillon (85 [cm]). En effet, la forme de la courbe polynômiale peut amener des aberrations, comme l'attribution d'un diamètre plus petit à un arbre plus haut.

La relation entre la hauteur et le dhp est de toute évidence un phénomène complexe, qui évolue avec le temps au sein d'un même peuplement. Deux différents peuplements n'auront pas non plus la même relation à un instant donné. Néanmoins, la fonction estimée reste un outil de prédiction très utile et suffisamment explicite pour la problématique forestière considérée. La taille de l'échantillon, qui peut paraître relativement petite, se justifie par le fait que le choix des arbres s'est fait sur une sélection subjective des individus, orientée par l'expérience et le savoir de l'inspecteur forestier.

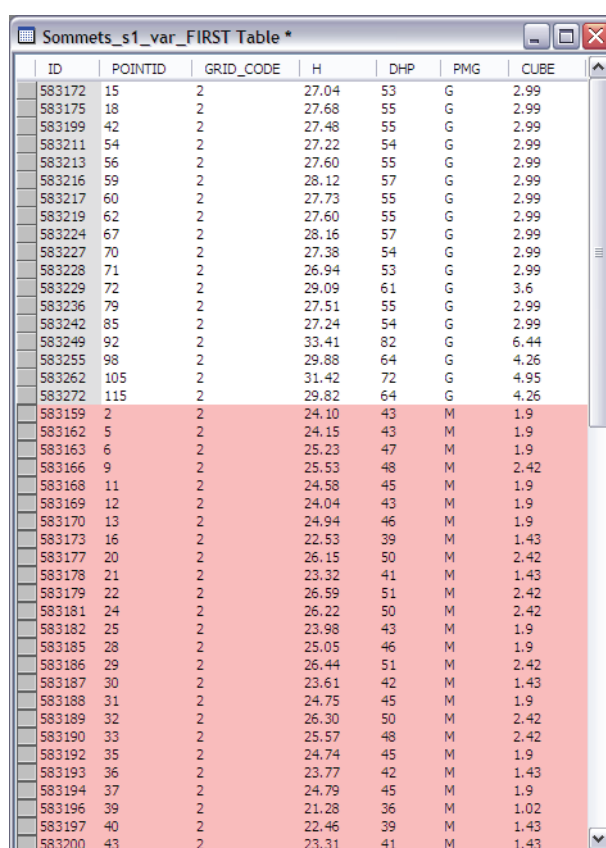
9.4.3. VOLUME SUR PIED

Sur la base de la régression entre les hauteurs d'arbre et le dhp, on élabore un nouveau tarif d'aménagement qui fait correspondre un volume de cubage à une classe donnée de hauteur LiDAR. Cette approche se justifie par le fait que la précision des mesures de hauteur LiDAR, proche voire inférieure au mètre, est voisine des mesures faites avec le tachéomètre. Pour cet exercice, un script implémenté dans le logiciel SIG Manifold permet d'ajouter et compléter automatiquement 3 champs dans la table des sommets:

- Un champ «dhp» enregistre le diamètre à hauteur de poitrine calculé par la fonction définie par la régression. La valeur du diamètre est arrondie à l'unité.
- Un champ «gmp», informe sur la classe de bois: «p» pour «petit» ($dhp < 35$ [cm]); «m» pour «moyen» (35 [cm] $< dhp < 55$ [cm]) et «g» pour «grand» ($dhp > 55$ [cm]). Pour cet exemple, les seuils implémentés correspondent aux valeurs en vigueur pour le canton de Neuchâtel. Ces valeurs peuvent facilement être adaptées à d'autres tarifs si nécessaire. Des définitions différentes sont par exemple en vigueur pour le tarif du canton de Genève et Fribourg;
- un champ «cube» donne le volume (en sylve) sur la base du diamètre. La relation est faite à travers une table de correspondance propre à chaque tarif.

La figure 9.12 illustre un échantillon des enregistrements d'une table des sommets complétée par le calcul du cubage (volume sur pied).

1. <http://sres-associated.anu.edu.au/mensuration/hgtcurve.htm>, décembre 2007.



ID	POINTID	GRID_CODE	H	DHP	PMG	CUBE
583172	15	2	27.04	53	G	2.99
583175	18	2	27.68	55	G	2.99
583199	42	2	27.48	55	G	2.99
583211	54	2	27.22	54	G	2.99
583213	56	2	27.60	55	G	2.99
583216	59	2	28.12	57	G	2.99
583217	60	2	27.73	55	G	2.99
583219	62	2	27.60	55	G	2.99
583224	67	2	28.16	57	G	2.99
583227	70	2	27.38	54	G	2.99
583228	71	2	26.94	53	G	2.99
583229	72	2	29.09	61	G	3.6
583236	79	2	27.51	55	G	2.99
583242	85	2	27.24	54	G	2.99
583249	92	2	33.41	82	G	6.44
583255	98	2	29.88	64	G	4.26
583262	105	2	31.42	72	G	4.95
583272	115	2	29.82	64	G	4.26
583159	2	2	24.10	43	M	1.9
583162	5	2	24.15	43	M	1.9
583163	6	2	25.23	47	M	1.9
583166	9	2	25.53	48	M	2.42
583168	11	2	24.58	45	M	1.9
583169	12	2	24.04	43	M	1.9
583170	13	2	24.94	46	M	1.9
583173	16	2	22.53	39	M	1.43
583177	20	2	26.15	50	M	2.42
583178	21	2	23.32	41	M	1.43
583179	22	2	26.59	51	M	2.42
583181	24	2	26.22	50	M	2.42
583182	25	2	23.98	43	M	1.9
583185	28	2	25.05	46	M	1.9
583186	29	2	26.44	51	M	2.42
583187	30	2	23.61	42	M	1.43
583188	31	2	24.75	45	M	1.9
583189	32	2	26.30	50	M	2.42
583190	33	2	25.57	48	M	2.42
583192	35	2	24.74	45	M	1.9
583193	36	2	23.77	42	M	1.43
583194	37	2	24.79	45	M	1.9
583196	39	2	21.28	36	M	1.02
583197	40	2	22.46	39	M	1.43
583200	43	2	23.31	41	M	1.43

Figure 9.12. Illustration d'un extrait des enregistrements d'une table des sommets LiDAR, pour laquelle le calcul du cubage selon le tarif neuchâtelois a été appliqué.

9.4.4. APPLICATION AUX SECTEURS DES FORÊTS COMMUNALES DE BEVAIX ET CORTAILLOD

CALCUL DES VOLUMES

Le tableau 9.3 reporte les résultats relatifs au premier secteur d'étude (Bevaix). Les volumes calculés par LiDAR sont comparés aux volumes mesurés par l'inventaire traditionnel «pied par pied». Etant donné que les deux méthodologies reposent sur un comptage à l'échelle de l'arbre, il a été possible de faire une comparaison en tenant compte de 3 catégories de diamètre: petit bois (dhp de 20 à 30 [cm]); bois moyen (dhp de 35 à 50 [cm]) et gros bois (dhp de 55 à 135 [cm]).

SECTEURS 1 (BEVAIX)

	dhp	Méthodologie LiDAR		Inventaire terrain	
		nb tiges	volume [sv]	nb tiges	volume [sv]
Gros bois	80	1	6.44		
	75				
	70	1	4.95	2	9.91
	65	2	8.52		
	60	1	3.6	3	10.81
	55	13	38.87	2	5.98
	Somme G	18	62.38	7	26.70
Bois moyen	50	14	33.88	10	24.19
	45	30	57	27	51.24
	40	22	31.46	35	50.01
	35	5	5.1	41	41.66
	Somme M	71	127.44	113	167.10
Petit bois	30	1	0.69	38	26.08
	25			39	17.65
	20			69	18.61
	Somme P	1	0.69	146	62.34
	TOTAL	90	190.51	266	256.14

Tableau 9.3. Résultat détaillé du nombre de tige et du volume de bois pour chaque classe de diamètre à hauteur de poitrine.

La distribution des volumes pour les 3 catégories de diamètre montre une sous-estimation importante du petit bois. Ce biais prévisible s'explique principalement par le fait que l'algorithme des maxima locaux ne considère que les arbres de la strate dominante (le toit de la couverture forestière). Dans l'ensemble, les gros bois et bois moyens sont relativement bien pris en compte (tableau 9.4). Pour ces deux classes réunies, le volume estimé est de 189.82 [sv] par la méthodologie LiDAR et 193.78 [sv] par l'inventaire de terrain. A l'inverse, le volume du petit bois est estimé à 62.33 [sv] pour l'inventaire de terrain contre seulement 0.69 [sv] pour l'approche LiDAR. Notons que ce biais est partiellement compensé par la régression utilisée pour dériver les dhp sur la base des hauteurs, qui a pour effet de surestimer légèrement le volume des gros bois.

	Méthodologie LiDAR	Inventaire de terrain
Petit bois	0.69	62.34
Moyen et gros bois	189.82	193.8
Total	190.51	256.14

Tableau 9.4. Comparaison du nombre de tiges et des volumes de bois estimés entre la méthodologie LiDAR et l'inventaire terrain de référence.

Par l'analyse des histogrammes de la distribution du nombre de tiges et du volume en fonction des classes de dhp, on constate une divergence nette entre les deux approches par les diamètres inférieurs à 45 [cm]. Au-dessus de ce seuil, la correspondance des dhp LiDAR et terrain est bonne, même si on constate une tendance pour la méthodologie LiDAR à surestimer légèrement les très gros bois. Au-dessous de ces valeurs, on observe que les petits dhp sont majoritairement ignorés par l'approche LiDAR.

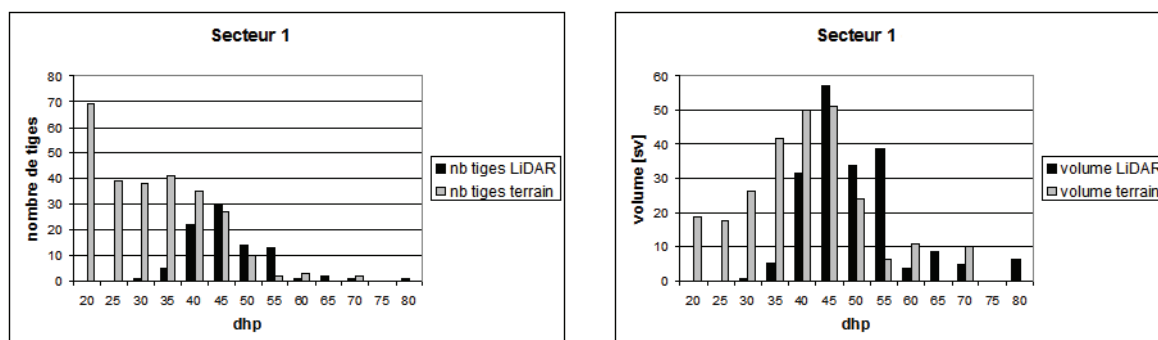


Figure 9.13. Distribution du nombre de tiges et du volume en fonction des classes de dhp.

La même démarche a été reproduite sur le secteur de Cortaillod, afin de vérifier si les observations relevées se confirment. Bien que similaire au site de Bevaix, cette seconde futaie est un peu moins dense avec 241 tiges à l'hectare contre 268 pour le secteur de Bevaix. En revanche, on observe la présence d'un plus grand nombre de gros diamètres, avec notamment 4 tiges ayant un dhp de 85 [cm], alors que les deux plus grosses tiges du premier secteur ont un dhp maximal de 70 [cm]. Les résultats relatifs au secteur 2 sont reportés dans les tableaux 9.5 et 9.6 et la figure 9.14.

SECTEURS 2 (BEVAIX)

		Méthodologie LiDAR		Inventaire terrain	
	dhp	nb tiges	volume [sv]	nb tiges	volume [sv]
G	110	1	11.42		
	105				
	100	1	9.7		
	95				
	90	1	8.03		
	85	3	21.66	4	28.90
	80	6	38.64	10	64.40
	75	6	34.08	8	45.45
	70	3	14.85	3	14.86
	65	1	4.26	2	8.52
	60	4	14.4	11	39.64
	55	9	26.91	5	14.94
	Somme G	35	183.95	43	216.71
M	50	7	16.94	9	21.77
	45	5	9.5	12	22.77
	40	5	7.15	11	15.72
	35	2	2.04	25	25.40
	Somme M	19	35.63	57	85.66
P	30	1	0.69	26	17.84
	25	1	0.45	28	12.67
	20	1	0.27	38	10.25
	Somme P	3	1.41	92	40.76
	TOTAL	57	220.99	192	343.13

Tableau 9.5. Résultat détaillé du nombre de tige et du volume de bois pour chaque classe de diamètre à hauteur de poitrine.

	Volume LiDAR [sv]	Volume d'inventaire [sv]
Petit bois	1.41	40.76
Moyen et gros bois	219.58	302.37
Total	220.99	343.13

Tableau 9.6. Comparaison du nombre de tiges et des volumes de bois estimés entre la méthodologie LiDAR et l'inventaire terrain de référence.

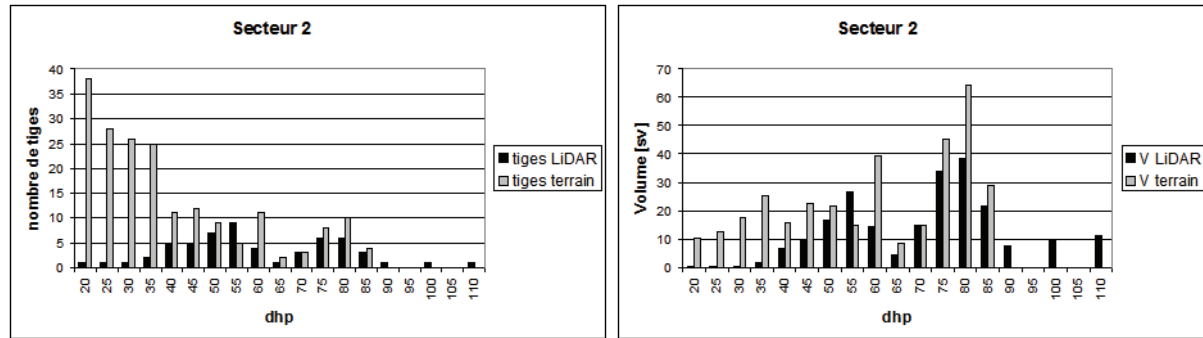


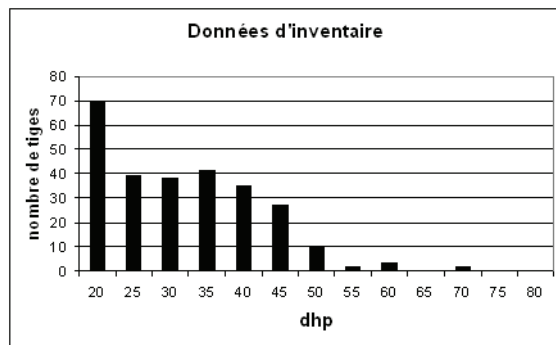
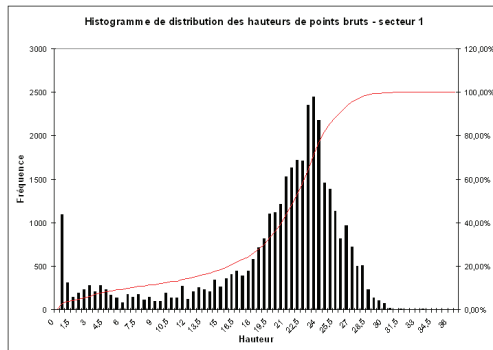
Figure 9.14. Distribution du nombre de tiges et du volume en fonction des classes de dhp.

L'analyse des histogrammes de la figure 9.14 révèle la même rupture au niveau des dhp se trouvant entre 45 et 50 [cm]. Pour les diamètres supérieurs, la correspondance entre la distribution des dhp LiDAR et terrain est bonne. La tendance de l'approche LiDAR à surestimer le dhp se confirme et se trouve même accentuée. En effet, le dhp maximum relevé par LiDAR est de 110 [cm], alors qu'il n'est que de 85 [cm] pour l'inventaire de terrain. Cette tendance s'explique par le calcul des paramètres de la fonction logarithmique attribuant un dhp sur la base d'une hauteur LiDAR. La prise en considération de plus gros dhp (supérieur à 100 [cm]) dans l'échantillon des 30 arbres permettrait d'améliorer l'estimation.

ANALYSE DE LA STRUCTURE

Comme cela a été mentionné précédemment, seuls les arbres de la strate dominante apportent une contribution significative au calcul du volume par l'approche LiDAR proposée. Or, il est indéniable que la structure verticale du couvert a une importance prépondérante sur la précision et la représentativité du résultat. Afin d'étudier le lien entre la structure d'un peuplement et la fiabilité de l'estimation du volume sur pied, une analyse comparative des deux secteurs d'étude a été réalisée. Pour se faire, la distribution des classes de diamètre issue des données d'inventaire et la distribution verticale des hauteurs de points bruts LiDAR ont été analysées (figure 9.15).

Secteur 1



Secteur 2

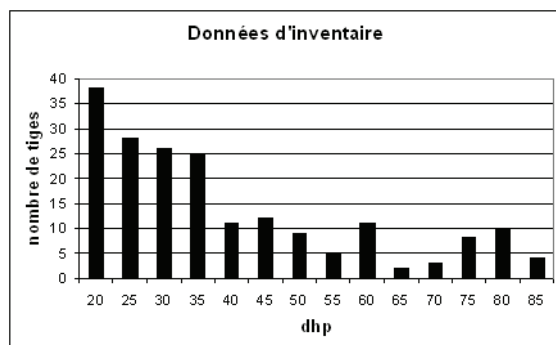
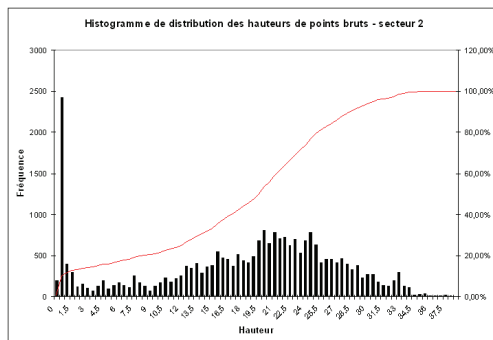


Figure 9.15. Mise en parallèle des histogrammes de la distribution verticale des hauteurs de points bruts (à gauche) avec l'histogramme de la distribution des dhp mesurés lors de l'inventaire de terrain (à droite).

L'histogramme de la distribution verticale des hauteurs de points bruts du secteur 1 présente les caractéristiques d'un peuplement relativement fermé et homogène. L'existence d'une strate dominante régulière est caractérisée par un pic se situant autour de 24 à 25 [m] de hauteur, ce qui correspond à un dhp d'environ 45 [cm] si on se réfère à la régression de la figure 9.11. La distribution de l'histogramme du secteur 2 est nettement plus étalée, ce qui reflète une structure de peuplement un peu plus ouverte où cohabite une gamme plus large de dhp. Cette constatation se confirme par l'étude de la distribution des diamètres mesurés lors de l'inventaire de terrain.

Lorsque l'on compare le nombre de tiges détectées par LiDAR avec le nombre de tiges relevées lors de l'inventaire, on constate qu'une structure étagée (figures 9.14 et 9.15) accentue le nombre d'omission en sous-bois. Les répercussions sur le calcul du volume sont évidentes. Dans le cas présent, 74.4% du volume d'inventaire a pu être estimé par LiDAR sur le secteur 1, contre seulement 64.4% pour le secteur 2. La structure verticale plus irrégulière du second secteur implique une identification plus délicate d'un grand nombre de tiges en sous-bois.

9.4.5. APPLICATION AU SITE DU BOIS DE JUSSY

La même procédure que celle mise en place pour les deux secteurs neuchâtelois a été évaluée pour le site du bois de Jussy. Pour chacune des 81 placettes d'échantillonnage considérées, les sommets ont été détectés par filtrage du MNH, les hauteurs attribuées et un volume de bois rapporté à l'hectare a été calculé sur la base du tarif d'aménagement en vigueur sur le canton de Genève.

VOLUMES SUR PIED

Sur les 81 placettes sélectionnées, les écarts entre les volumes estimés par LiDAR et les volumes dérivés de l'inventaire sont très variables.

Ecart minimum	Ecart maximum	Médiane des écarts	Ecart-type des écarts
0 [sv/ha]	210.05 [sv/ha]	46.59 [sv/ha]	47.42 [sv/ha]

Tableau 9.7. Statistiques des écarts entre les volumes par hectare estimés par LiDAR et mesurés par l'inventaire de terrain. Ces valeurs sont relatives aux 81 placettes sélectionnées dans l'étude.

A titre de comparaison, un volume de 46 [sv/ha] est équivalent au volume sur pied¹ d'une tige ayant un diamètre de 50 [cm] (ou 2 tiges ayant un diamètre de 35 [cm]) sur une placette de 11 [m] de rayon. La corrélation entre les volumes LiDAR et les volumes d'inventaire donne un R^2 de 0.5. Le coefficient de corrélation de Pearson calculé est de 0.645.

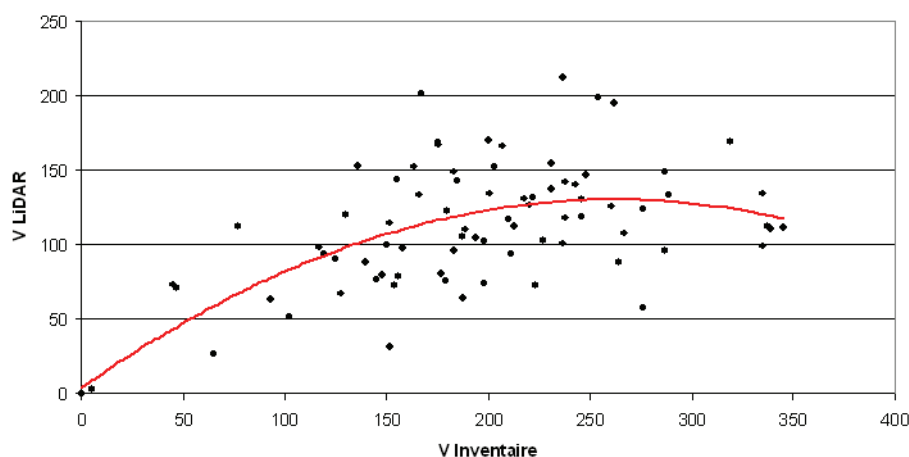


Figure 9.16. Régression entre les volumes LiDAR et les volumes d'inventaire pour les 81 placettes d'échantillonnage sur le bois de Jussy.

Les causes des différences de volume observées peuvent être multiples. Tout d'abord, une année sépare l'inventaire et l'acquisition LiDAR. Il se peut que des interventions (coupes) aient eu lieu entre ces deux dates. Ensuite, la sélection du nombre d'arbres pris en considération pour chacune des placettes repose sur la position du sommet détecté par LiDAR. Cette localisation peut différer de la position du tronc observée de puis le sol, et ainsi générer des divergences pour les arbres en limite de placette. Le mélange et la structure hétérogène du couvert sont également des paramètres essentiels à connaître pour la bonne interprétation des éléments. Une analyse plus approfondie a donc été réalisée sur 10 placettes, afin d'apporter des éléments de réponse.

ANALYSE DE LA STRUCTURE

Afin de mieux expliquer les écarts de volume constatés, 5 placettes ayant des variations inférieures à

1. Le tarif de cubage genevois correspondant à un tarif de feuillus.

10 [sv/ha] (*sélection 1*) et 5 placettes ayant des écarts de volume supérieur à 160 [sv/ha] (*sélection 2*) ont été étudiées plus en détail. Une série de statistiques dérivées des données LiDAR et de l'inventaire de terrain ont été comparées et sont reportées dans les tableaux 9.8 à 9.10.

Première constatation importante, et qui confirme les résultats obtenus sur les secteurs de Bevaix, seuls les arbres composant la strate dominante sont correctement détectés par la méthodologie LiDAR. En conséquence, les placettes ayant une structure simple, peu stratifiée, ont un volume de bois relativement bien estimé par l'approche LiDAR. On constate que les 5 placettes ayant donné les meilleurs résultats (*sélection 1*) ne présentent pas de gros bois dans l'inventaire de terrain. Elle se caractérisent plutôt par la présence de tiges ayant des hauteurs relativement homogènes. Le meilleur résultat a été obtenu sur la placette «167255», qui se compose pour l'essentiel de petits bois, soit 91% du volume total du bois sur la placette.

A l'inverse, pour les placettes ayant une distribution de diamètres plus hétérogène, à l'exemple de la placette «167196», le sous-étage est considérablement occulté par la strate dominante des gros bois, avec pour conséquence une sous-estimation du nombre du bois moyen et du petit bois. Cela se répercute de manière significative sur l'estimation du volume total.

	Sélection 1					Sélection 2				
No parcelle	167255	167213	167224	167233	167269	167196	167254	167209	167243	167210
Vol. LiDAR ^a [sv/ha]	183	193	192	147	129	135	78	160	164	169
Vol. inventaire [sv/ha]	183	189	200	152	125	345	276	339	337	335
Ecart Vol. [sv/ha]	0	-4	8	5	-8	210	198	179	173	166

Tableau 9.8. Comparaison des volumes d'inventaire et LiDAR sur deux sélections de 5 placettes chacune. La sélection 1 correspond aux 5 meilleurs résultats; la sélection 2 correspond aux 5 moins bons résultats.

a. Les volumes calculés par la méthodologie LiDAR ont été arrondis à l'unité.

	Sélection 1					Sélection 2				
No parcelle	167255	167213	167224	167233	167269	167196	167254	167209	167243	167210
Diam. dom. [cm]	27	37	34	35	29	46	42	51	52	38
% Feuillus	100	100	59	100	100	95	100	87	100	100
% Résineux	0	0	41	0	0	5	0	13	0	0
%Vol. Petit bois	91	30	57	24	64	25	38	9	19	37
%Vol. Bois moy.	9	70	42	76	36	38	42	52	28	42
%Vol. Gros bois	0	0	0	0	0	37	20	38	53	22

Tableau 9.9. Statistiques issues de l'inventaire de terrain.

L'analyse plus fine de la distribution de points bruts LiDAR sur les placettes apporte également des éléments de réponse. On observe par exemple sur la placette «167196» qu'un arbre sort nettement du couvert avec une hauteur de 22.5 [m] (figure 9.17). Cela a pour conséquence probable de masquer la détection d'autres individus de taille inférieure, présents dans le voisinage direct. Cette caractéristique a d'autant plus d'importance que la superficie de la placette d'échantillonnage est relativement petite. En comparaison, la canopée de la placette «167255» a des hauteurs nettement plus homogènes. La distribution des sommets est ainsi uniforme et plus conforme à la réalité terrain. Cela se traduit finalement par une estimation du volume proche de la réalité. Cette observation est confortée par l'analyse de la placette «167234» qui se trouve à l'intérieur d'une plantation et pour laquelle l'écart entre le volume d'inventaire et l'estimation par l'approche LiDAR n'est que de 21 [sv/ha] (227 [sv/ha] estimé par LiDAR alors que l'inventaire de 2004 donne 248 [sv/ha]).

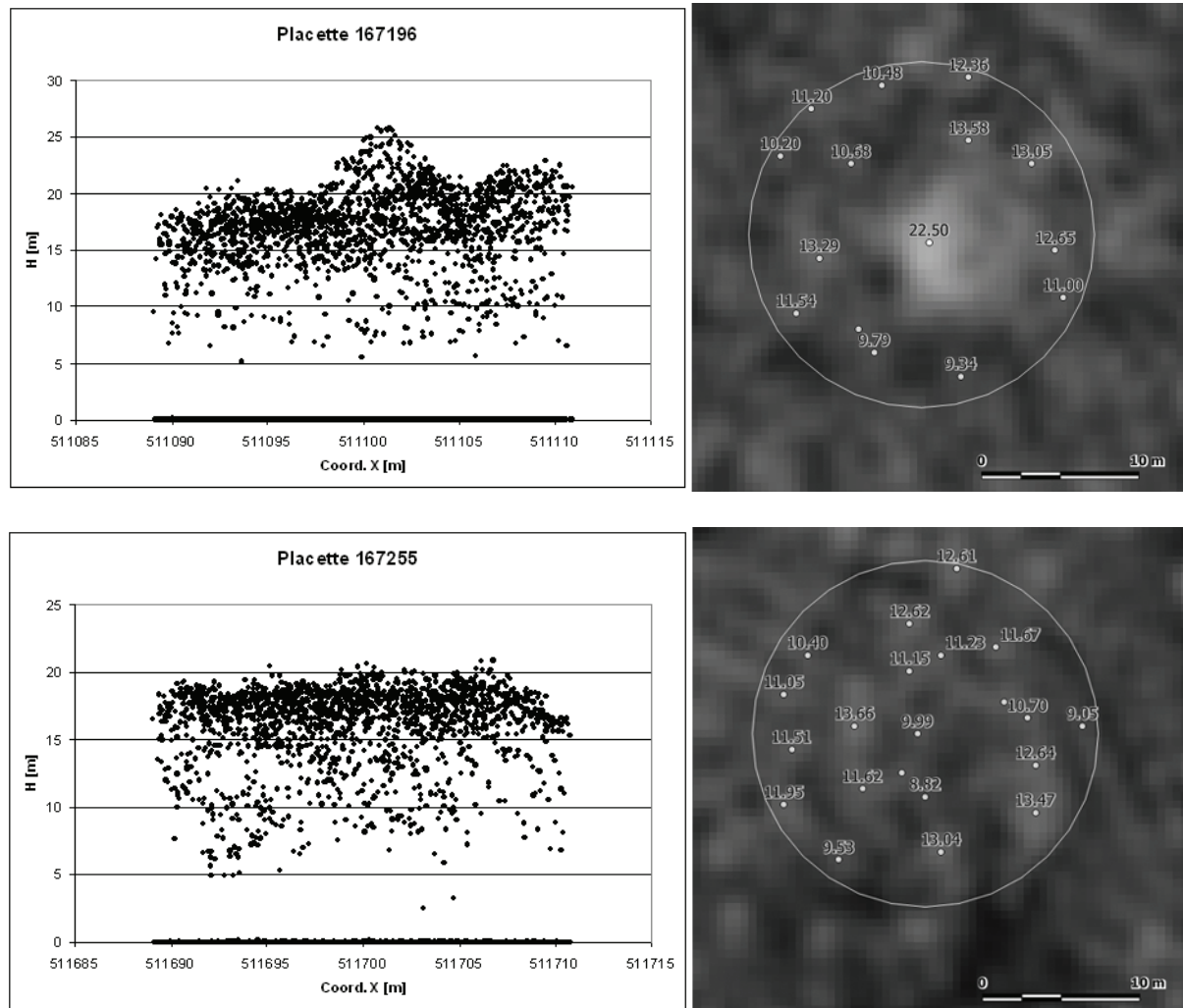


Figure 9.17. Analyse de la distribution des hauteurs de points bruts (à gauche) et de la localisation des sommets (à droite) pour une sélection de deux placettes. La hauteur des sommets sur l'image de droite est exprimée en mètre. Source de données: © SITG (www.SITG.ch)

L'analyse des indicateurs comme l'écart-type de la distribution des hauteurs de points bruts (*Ecart-type*) ou le taux de pénétration des impulsions (*Tx de pénétr.*) à l'intérieur des pacettes (tableau 9.10) ne permet cependant pas d'expliquer les écarts de volume entre les données d'inventaire et l'approche LiDAR.

	Sélection 1					Sélection 2				
	167255	167213	167224	167233	167269	167196	167254	167209	167243	167210
Ecart-type [m]	8.24	9.63	9.07	9.45	7.30	8.66	8.47	9.4	9.1	9.11
Tx de pénétr. [%]	43	45	43	52	37	37	40	36	48	42
%Vol. Petit bois	91	48	18	53	85	72	79	54	66	64
%Vol. Bois moy.	9	52	82	47	15	28	21	46	34	36
%Vol. Gros bois^a	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 9.10. Statistiques dérivées du LiDAR pour deux sélections de 5 placettes chacune.

- a. Les classes de bois sont séparées comme suit: petits bois: dhp compris entre 20 et 30 [cm]; bois moyens: dhp compris entre 35 et 50 [cm]; gros bois: dhp compris entre 55 et 110 [cm].

9.5. SYNTHÈSE ET CONCLUSION

Le fait d'attribuer un volume de bois sur une référence de hauteur LiDAR implique qu'il faille prendre en compte le type de station, le mélange des essences, et surtout s'assurer que la couverture et la densité des points bruts est suffisante pour garantir une modélisation satisfaisante du couvert. Si les systèmes LiDAR à impulsions permettent de couvrir rapidement de vastes étendues et à des coûts de plus en plus réduits, la principale difficulté réside dans la détection des arbres appartenant au sous-étage. Pour l'approche proposée, qui repose sur la reconnaissance des tiges individuelles, cette limitation aura des répercussions déterminantes sur le résultat final. La connaissance de la structure du peuplement étudié est donc une caractéristique essentielle à connaître pour l'évaluation correcte du résultat. Dans ce contexte, les résultats dérivés des approches basées sur des surfaces permettent d'obtenir des résultats non biaisés plutôt exacts. Le volume de bois est alors prédit en établissant un modèle de régression non biaisé reliant un échantillon de mesures in situ et une ou plusieurs statistiques dérivées des données LiDAR (percentiles LiDAR par exemple) (Naesset, 1997; Maltamo et al., 2006a et b).

Sans être exhaustive, cette étude apporte néanmoins des réponses concrètes sur le potentiel et surtout sur les limites des modèles altimétriques LiDAR pour l'estimation du volume sur pied par le biais du calcul d'un tarif de cubage. Sur la base des résultats obtenus pour l'ensemble des sites d'étude, il est important de revenir sur l'incidence des trois phases clé de la méthodologie présentée: la détection des sommets, la détermination de la fonction permettant de dériver un dhp sur la base d'une hauteur LiDAR et le calcul du volume proprement dit.

9.5.1. DÉTECTION DES SOMMETS

La détection des sommets est l'étape principale sur laquelle repose la suite des traitements. L'efficacité de l'algorithme des maxima locaux à modéliser correctement la distribution des tiges composant le peuplement, ou la placette d'échantillonnage, a pu être validée sur la base des inventaires de terrain. De manière systématique, on a pu constater que le nombre des individus du sous-étage est largement sous-estimé en présence d'un peuplement étagé. Pour le premier secteur étudié sur la commune de Bevaix, le volume du petit bois a été estimé à 0.69 [sv] par l'approche LiDAR, alors que l'inventaire de terrain reporte un volume de 62.33 [sv]. Cette caractéristique découle logiquement des propriétés du MNH raster qui ne présente qu'une vue du toit de la végétation. On en déduit donc que la précision du volume estimé est dépendante de la structure du peuplement. En faisant le parallèle avec la position sociale des arbres selon la classification de Kraft (Schütz, 1990) on peut estimer que les arbres qui sont en mesure de participer activement au calcul du volume sont les arbres dépassant nettement par leur stature le niveau du couvert (*arbre prédominant*), les arbres dont la cime atteint encore la partie supérieure du couvert, présentant une bonne croissance en hauteur et un houppier bien équilibré de toutes parts (*arbres dominants*), ainsi que dans une moindre mesure les arbres dont la cime atteint encore la partie du couvert, mais possédant un houppier moins vigoureux et moins bien équilibré que les dominants (*arbres codominants*). En revanche, les arbres n'atteignant plus la partie supérieure du couvert, c'est-à-dire dont la cime ne reçoit plus de lumière directe, mais qui sont encore en contact avec les dominants et codominants (*arbres intermédiaires*) et les arbres dont la cime n'est plus en contact avec la strate principale du peuplement et dont le sommet est surpassé en tout cas par une branche d'un autre arbre (*arbres dominés*) ne sont pas pris en considération dans le calcul du volume (figure 9.18).

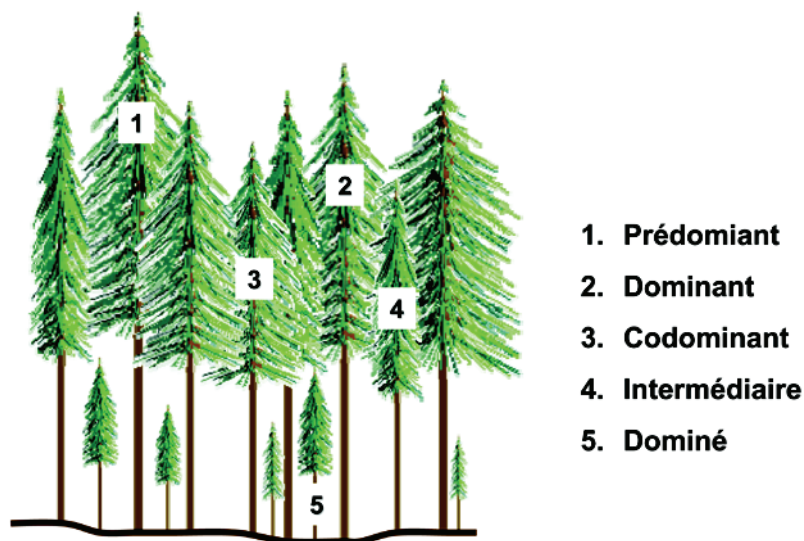


Figure 9.18. Position sociale des arbres en peuplement selon la classification de Kraft (d'après Schütz, 1990)

Toute correction du volume dans le but de prendre en compte le volume du sous-étage nécessite une analyse plus détaillée de la structure verticale du couvert. Cette opération peut passer par un examen attentif du nuage de points bruts afin d'extraire un indicateur permettant d'estimer l'importance relative des arbres intermédiaires et dominés dans la placette ou le peuplement concerné. L'étude réalisée dans ce chapitre n'a fait que mettre en évidence le rôle prépondérant de la structure du couvert sur l'estimation du volume. Une étude complémentaire serait maintenant nécessaire pour identifier un indicateur en mesure d'apporter une correction robuste et objective du volume en fonction de la structure verticale. A priori, l'écart-type ou le taux de pénétration des impulsions n'apportent pas une information suffisamment discriminante (tableau 9.10). Une piste à examiner serait la recherche des points de rupture dans la distribution verticale des mesures LiDAR par la méthode de Jenk's. Elle permet en effet de minimiser la somme des variances à l'intérieur de chacune des classes de hauteur définie.

La qualité des données LiDAR est également une caractéristique importante en amont du processus. Avec un LiDAR à petite empreinte, une densité de points bruts élevée (4 [pts/m²] et supérieure) permettra de modéliser relativement précisément la forme des cimes et ainsi faciliter l'extraction des sommets individuels. L'algorithme d'interpolation doit encore être choisi en conséquence, afin de lisser suffisamment le MNH pour éliminer le bruit lié à la haute résolution et à la nature hétérogène du couvert, tout en conservant une représentation précise des houppiers. Ces paramètres n'ont volontairement pas fait l'objet d'une étude poussée et leur choix repose principalement sur la base de recherches proposées dans la littérature ou développées dans les chapitre 4. La structure des cimes, souvent spécifique à une essence donnée, est également une caractéristique importante. L'influence du mélange des essences sur la précision de l'estimation du volume sur pied n'a pas été concrètement abordée. Les sites évalués sont effectivement composés pour la grande majorité de feuillus. Il est fort probable que la sous-estimation du nombre de tiges rencontrée dans cette étude soit moindre dans un peuplement pur de résineux.

9.5.2. TARIF DE CUBAGE LiDAR

La mise en place d'un nouveau tarif de cubage unique (comprenant feuillus et conifères) reliant la hauteur LiDAR au volume sur pied est une étape sensible. Le choix d'une fonction logarithmique se justifie, même si l'on observe une légère surestimation des volumes pour les gros bois. La régression présentée par la figure 9.11 repose sur un échantillonnage unique de 30 arbres choisis de manière subjective avec le forestier. Cette démarche a été privilégiée en raison des contraintes de temps pour terminer l'étude. La

réalisation de nouvelles régressions sur différents types de peuplement ayant des mélanges variés constituerait néanmoins un complément d'étude intéressant. Il serait par exemple utile de quantifier l'influence du type de station sur le résultat.

9.5.3. LE CALCUL DU VOLUME

Malgré les limitations relatives à la structure des peuplements et l'approximation qui est faite en considérant un tarif unique d'aménagement, il n'en reste pas moins que l'estimation du volume sur pied par LiDAR repose sur une technique robuste et couvrante. Elle s'avère en tout cas efficace pour fournir une première estimation de la strate dominante. Si l'on se réfère aux secteurs de Bevaix, les volumes estimés correspondent à 74.4% et 64.4% du volume d'inventaire sur les secteurs 1 et 2 respectivement. La poursuite des investigations doit maintenant se concentrer sur une prise en compte plus immédiate de la structure du couvert pour calibrer le calcul du volume. L'influence du mélange et du type de station doivent également faire l'objet de recherches plus poussées. La croissance des essences est notamment dépendante de l'altitude et de la densité du couvert. Il serait intéressant d'en estimer l'impact.

La corrélation entre les volumes LiDAR et les volumes d'inventaire sur les 81 placettes d'échantillonnage du bois de Jussy (Fig. 9.14) est relativement faible. Cela s'explique en partie par la divergence de point de vue entre la méthodologie LiDAR, qui sélectionne les arbres appartenant à une placette donnée par une analyse du toit de la végétation, et la méthode conventionnelle, qui porte sur une analyse de terrain. Le nombre d'arbres prise en compte pour le calcul du volume aura d'autant moins d'importance que la surface considérée sera petite. La méthode semble donc mieux adaptée à des calculs de volume sur des surfaces relativement grandes (à l'échelle d'une division forestière par exemple) et peu appropriée au calcul d'un volume par placette d'échantillonnage. Ce constat n'est cependant pas vrai pour toutes les méthodes. Les approches basées sur les surfaces autorisent des prédictions à l'échelle de la placette.

Le choix d'une étude à l'échelle de l'arbre a été motivé par les résultats encourageants obtenus sur l'identification des arbres et les calculs de hauteur par LiDAR. Dans une vision plus large, un volume dérivé directement de l'analyse du nuage de points bruts LiDAR, ou encore la prise en compte d'une information spectrale, sont des voies intéressantes à investiguer. De plus, avec les progrès technologiques, l'utilisation des systèmes LiDAR à ondulation continue va certainement tendre à se généraliser dans un avenir proche. L'analyse du profil de couvert qui en résulte est sans hésitation une information très riche pour quantifier plus précisément le volume.

Pour conclure, il ne faut pas perdre de vue que les techniques d'inventaire sur le terrain sont également sujettes à des erreurs liées aux mesures des caractéristiques de l'arbre, au tarif de cubage, et à l'échantillonnage. La précision de la mesure du dhp va notamment dépendre de l'appareil de mesure (compas forestier ou ruban) et du choix de la méthode de mesure (une seule mesure ou la moyenne arithmétique de plusieurs mesures). Les diamètres sont arrondis au centimètre pour Genève, ou tous les 5 [cm] pour Neuchâtel. L'emploi d'un tarif de cubage unique ou adapté à certaines caractéristiques des arbres (feuillus ou conifères) aura aussi des répercussions évidentes sur le résultat. Il se peut encore que certains arbres soient comptés à double ou au contraire oubliés durant l'inventaire.

Quoi qu'il en soit, en terme de gestion et spécialement pour une estimation précise de l'accroissement, c'est la répétitivité de la méthode et l'analyse entre les inventaires successifs qui reste l'objectif principal. Le LiDAR peut ainsi trouver sa place pour fournir une information couvrante et facilement reproductible. En l'état actuel du développement de la méthodologie présentée, le volume peut considérablement diverger de la réalité terrain, en raison de la sous-estimation du volume du sous-étage. En revanche, la variation du volume entre deux situations (ou périodes d'inventaire) constitue une information riche pour le gestionnaire. Une étude portant plus directement sur le potentiel du LiDAR pour l'estimation de l'accroissement semble se justifier. Le chapitre 10 apporte déjà quelques éléments de réponse en illustrant le potentiel résultant de l'analyse diachronique de modèles altimétriques LiDAR dans un environnement forestier.

EVOLUTION D'UNE FORÊT

10.1. PROBLÉMATIQUE

La comparaison de plusieurs jeux de données LiDAR acquis sur un même site, mais à des périodes différentes, ouvre de nouvelles perspectives pour l'étude et le suivi de sites particuliers. L'étude présentée dans ce chapitre concerne l'évaluation des dégâts causés par une violente tempête qui a ravagé la forêt communale de Boudry le 2 janvier 2007 (Neuchâtel). Cette tempête possède la troisième plus grande importance en terme de volume de bois touché depuis le début du siècle passé.



Figure 10.1. Dégâts dans la forêt de Bevaix (photo: P. Junod).

Dans un tel contexte, les besoins en matière de détection, délimitation et quantification des secteurs touchés s'inscrivent dans le cadre d'une gestion forestière optimale et durable. Les démarches actuelles reposent largement sur des techniques de photo-interprétation ainsi que sur de longues campagnes de levés au sol. Néanmoins, les difficultés liées à la topographie, à la nature empirique des procédures et au large domaine de compétence nécessaire pour un tel travail rendent les méthodes de description forestières laborieuses.

L'objectif de la présente étude consiste à mettre en place une méthode pour la délimitation automatique des secteurs forestiers touchés par une tempête. La localisation des dégâts, ainsi que leurs intensités, repose sur l'analyse comparative de deux MNH: l'un antérieur et l'autre postérieur à l'événement. Il s'agira encore d'apporter une réflexion sur la comparabilité de modèles numériques LiDAR issus d'années et de conditions d'acquisition différentes.

10.2. ETAT DE L'ART DANS LE DOMAINE DU LiDAR

Fin des années 90, les problèmes d'érosion des côtes motivèrent les premières recherches portant sur la détection de changements par l'analyse de plusieurs couvertures LiDAR espacées dans le temps. La NASA et la NOAA étudièrent notamment l'amplitude du phénomène d'érosion des plages et des falaises sur toute la côte ouest des Etats-Unis¹. En milieu urbain, plusieurs études ont prouvé le potentiel du LiDAR pour détecter les nouvelles constructions ou au contraire déceler les bâtiments détruits par des phénomènes naturels comme les tremblements de terre (Murakami et al., 1998; Thuy Vu et al. 2004). Concernant la foresterie, encore peu de recherches publiées traitent de l'étude comparative de deux ou plusieurs modèles altimétriques LiDAR. Deux exemples choisis permettent cependant d'illustrer la diversité des thématiques touchant l'analyse multi-temporelle en végétation.

Les travaux de Yu et al. (2004 et 2005) portent sur la détection des arbres coupés et la quantification de la croissance. La méthodologie repose sur l'analyse d'un modèle issu de la différence entre un MNH récent avec un MNH plus ancien. Un seuillage fixé à 7 [m] permet d'isoler les secteurs marqués par de gros changements, puis un filtre morphologique est appliqué pour l'élimination du bruit. La détection des arbres individuels coupés repose sur une segmentation orientée objet. Sur les 83 arbres abattus identifiés sur le terrain, 61 ont été correctement détectés. La croissance forestière a été estimée à l'échelle des peuplements en utilisant un algorithme établissant la correspondance arbre par arbre sur les deux modèles d'années différentes. La précision de la croissance estimée, basée sur des références mesurées sur le terrain ainsi que sur des analyses statistiques, est de 10 à 15 [cm] à l'échelle du peuplement.

Vepakomma et al. (2006) proposent une étude de la dynamique d'une forêt boréale mixte à Québec. Plus particulièrement, les travaux concernent l'analyse des nouvelles trouées et l'évaluation de la croissance verticale du couvert. Contrairement à l'étude de Yu et al. (2004), qui repose sur une densité élevée de points bruts (environ 10 [pts/m²]), la méthodologie exploite une densité moyenne de 0.03 et 0.2 [pts/m²]. La détection des trouées ne nécessite pas non plus le calcul d'un modèle des différences, mais consiste à analyser parallèlement les MNH de deux années différentes. L'identification d'une nouvelle trouée répond à un double critère: une variation de hauteur significative entre les deux années, ainsi qu'une surface minimale ($S > 5$ [m²]). L'examen de la croissance verticale, qui se fait à l'échelle de l'arbre, passe par la délimitation manuelle des couronnes résultant de l'interprétation d'une image multi-spectrale.

10.3. SITE ET SOURCES DE DONNÉES

10.3.1. LE SECTEUR FORESTIER TOUCHÉ PAR LA TEMPÊTE

L'objet de l'étude est la tempête du 2 janvier 2007 qui toucha la forêt communale de Boudry, située à la sortie des gorges de l'Areuse. L'équivalent de la moitié de l'accroissement annuel de la commune s'est fait casser et déraciner. Des informations minutieuses sur les secteurs touchés ont été collectées par une équipe de forestiers quelques jours après l'événement. Il en résulte notamment deux documents:

1. Une cartographie des chablis, qui informe sur la taille des essences et la direction de leur chute. Ce

1. http://coastal.er.usgs.gov/lidar/AGU_fall98/, décembre 2007.

relevé minutieux et méthodique a permis de recenser plus de 1250 chablis. Un ombrage du MNH, interpolé sur les données issues du système ALTMS (année d'acquisition: 2001 & 2002), a facilité la localisation des tiges sur le terrain.

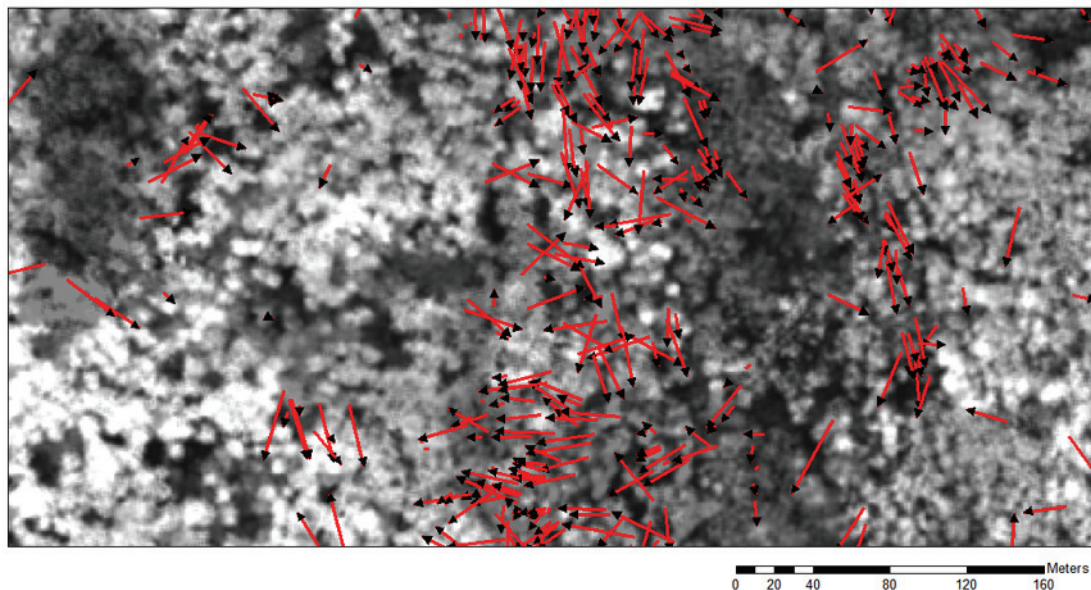


Figure 10.2. Extrait d'une cartographie des chablis causés par la tempête du 2 février 2007. Les flèches indiquent la direction de chute de l'arbre. Le fond de plan est le MNH 2001: plus la teinte est claire, plus la hauteur du pixel est élevée.

Source de données: MNS-MNT-MO; © 2001 Données de la mensuration officielle (www.swisstopo.ch) & MNT, MNS; © SITN (www.ne.ch/sitn).

2. Une cartographie de la localisation des dégâts reportant la délimitation des secteurs forestiers touchés. Ces données collectées par les forestiers reposent sur des investigations de terrain, ainsi que sur le recensement de chablis. Aucune photographie aérienne du site après la tempête n'était encore à disposition. La distinction entre les secteurs ayant subi des dégâts diffus ou concentrés repose sur une interprétation visuelle sur le terrain. Les dégâts concentrés correspondent à des secteurs où la totalité des arbres ont été couchés. En revanche, il subsiste un certain pourcentage d'arbres sur pied dans les secteurs où les dégâts sont identifiés comme étant diffus.

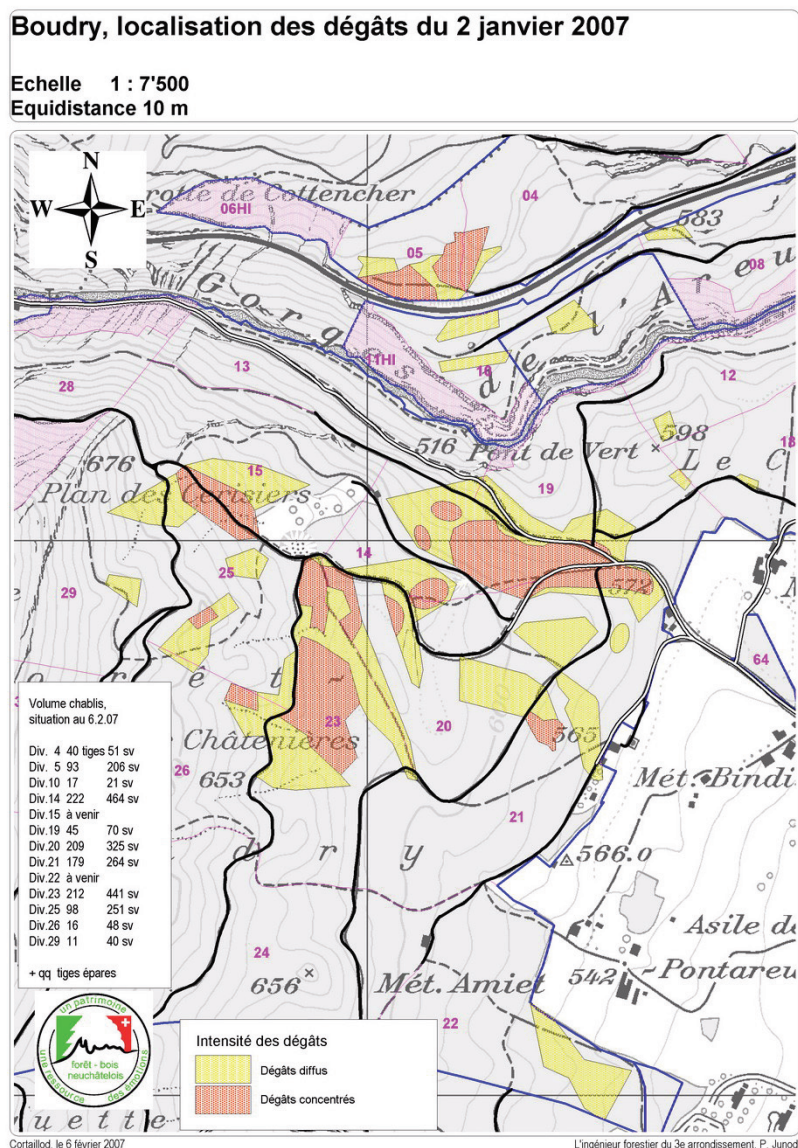


Figure 10.3. Cartographie des dégâts causés par la tempête du 2 février 2007. Les délimitations reposent sur une investigation de terrain de plusieurs jours par les forestiers. (En plein les zones fortement touchées, en hachuré les secteurs de dégâts diffus).

10.3.2. DONNÉES LIDAR ET ORTHOPHOTOS

Le tableau 10.1 résume les données de télédétection à disposition ainsi que leurs dates d'acquisition pour le site d'étude. Les MNH raster exploités ont une résolution spatiale d'un mètre et sont issus d'une interpolation TIN réalisée par l'application TerraScan¹.

1. www.terrasolid.fi, décembre 2007.

	Données LiDAR ^a		Données photographiques (orthophotos RGB)		
Site	Système	Date du vol	Caméra	Date du vol	Résolution spatiale
Boudry	ALTMS	01, 02/2001 & 10/2002	DMC Zeiss Intergraph	06/2005	10 [cm]
Boudry	Scan2map	05/2007	-	-	-

Tableau 10.1 Tableau résumé des données utilisées pour l'étude consacrée à l'étude diachronique.

- a. Les données techniques spécifiques aux systèmes LiDAR, ainsi que les paramètres des missions de vol, sont exposés au chapitre 3 «Source et nature des données LiDAR».

10.4. ESTIMATION DES DÉGÂTS

La méthodologie repose sur l'analyse diachronique de deux MNH LiDAR. Les modèles sources (MNT et MNS) raster, à l'origine des calculs des MNH, sont de résolution métrique et ont une précision altimétrique élevée (environ 50 [cm] 1s). Cette précision est suffisante pour déceler l'accroissement du couvert, sachant qu'une période de 5 ans sépare nos deux modèles. Afin de faire ressortir les divergences entre les deux représentations, le MNH postérieur à l'événement d'intérêt (la chute d'arbres dans notre cas) est soustrait à la situation antérieure. Un modèle numérique des différences (MND) est ainsi créé.

Les écarts non significatifs pour notre problématique, qui est la détection des arbres couchés, mais qui se justifient par le fait que l'on étudie un milieu naturel en perpétuelle évolution ont été éliminés par un traitement particulier. Ajoutons que l'hétérogénéité entre les densités de mesures des deux campagnes d'acquisition LiDAR, ainsi que la qualité variable de la classification du MNT, sont également la source de divergences ou de fluctuations de la forme et de l'agencement des couronnes. Les conditions de vent lors de l'acquisition peuvent également avoir une influence plus ou moins marquée sur la modélisation de la canopée. L'élimination de ce bruit sur le MND est une phase essentielle pour obtenir ensuite une segmentation significative des zones touchées. Finalement, les modifications du couvert relatives à la saison du vol, et donc à la période de végétation, sont également à considérer. La forêt de Boudry est constituée de peuplements forestiers mixtes avec des dizaines d'essences différentes, dont certaines rares comme l'alisier torminal, l'alisier blanc, l'orme lisse ou encore l'érable à feuille d'orbier. La présence de feuillus peut notamment amener localement à une mauvaise interprétation du MND. Les vols de 2001 et 2002 ayant eu lieu en février et octobre respectivement, certains feuillus dénudés peuvent ne pas être modélisés sur le MNH raster correspondant. En revanche, ils seront modélisés sur le MNH 2007, issus d'une campagne d'acquisition au mois de juin, et donc lorsque les feuillus sont couverts de feuilles. Ces particularités liées à l'état phénologique sont essentielles lors de l'interprétation des résultats. Concrètement, la délimitation des dégâts forestiers se décompose en 6 étapes successives (Figure 10.4):

1. Le lissage des MNH par un filtre gaussien.
2. Le calcul du MND (MNH 2001 - MNH 2007).
3. L'application d'un filtre statistique sur le MND.
4. La reclassification du MND filtré.
5. La vectorisation des délimitations.
6. L'élimination des surfaces non significatives.

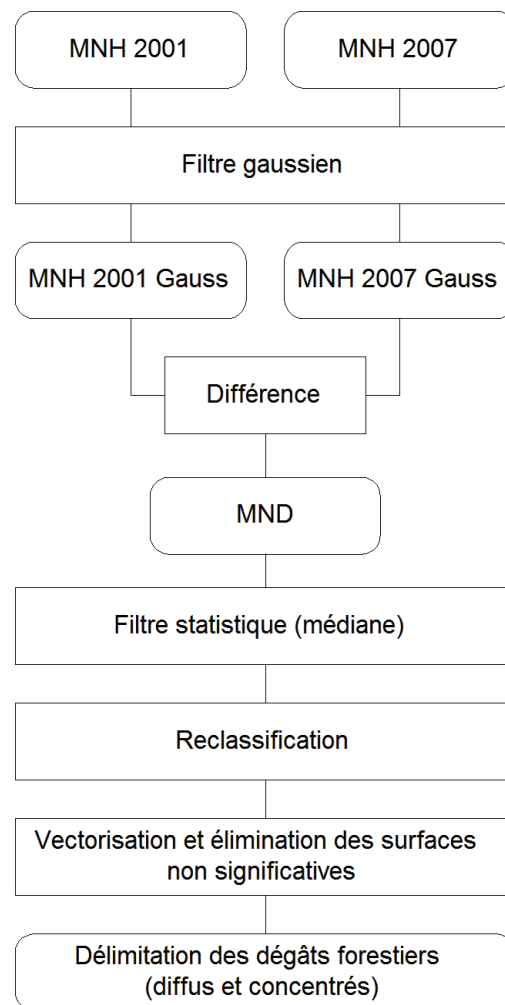


Figure 10.4. Etapes méthodologiques pour la délimitation des dégâts forestiers.

L'application d'opérations mathématiques impliquant plusieurs modèles numériques exige que ces derniers possèdent des caractéristiques identiques: la résolution spatiale de la grille interpolée à partir des nuages de point bruts, tout comme la méthode d'interpolation, doivent être analogues. Après avoir au préalable vérifié la cohérence des nuages de points issus des deux systèmes en les superposant dans l'application TerraScan, les MNT et MNS au format raster ont été créés en utilisant une interpolation TIN. Ce choix se justifie par la propriété du réseau irrégulier de triangles à bien tenir compte des fortes variabilités locales de la hauteur du couvert. La résolution de la grille générée à partir du modèle TIN a été fixée à 1 [m] pour chacun des modèles. Le choix s'est fait selon le nuage de points bruts de plus faible densité issu du système ALTMS. Le MNH est ensuite calculé pour chaque jeu de données en soustrayant le MNT au MNS. Le modèle numérique de différence dont chaque pixel représente la différence de hauteur de la canopée entre 2001 (avant la tempête) et 2007 (après la tempête) est ensuite obtenu en soustrayant le MNH de la situation 2007 à son homologue de 2001.

Le filtrage des MNH sources par un filtre gaussien permet de supprimer un certain niveau de bruit, tout en conservant au maximum la morphologie générale de la canopée. Le filtre choisi, matérialisé par une fenêtre 5 par 5 est identique à celui présenté dans le chapitre 4:

$$G(x, y) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \delta^2} \cdot e^{-\frac{(x^2 + y^2)}{2 \cdot \delta^2}} \quad (10.1)$$

L'étape suivante consiste à appliquer un filtre de convolution qui permet de réattribuer une valeur à chaque pixel du MND en tenant compte de son voisinage. Plus concrètement, la médiane de la valeur des pixels se trouvant à l'intérieur d'un cercle de 20 [m] de rayon est réattribuée au pixel central. Plus le rayon est grand, plus l'effet de lissage est important. Le choix d'un rayon de 20 [m] est un bon compromis, car cette distance est suffisamment grande pour apporter l'effet de lissage souhaité, tout en préservant une résolution suffisante pour identifier la disparition d'arbres isolés. Ce traitement est utile pour éliminer un bruit résiduel lié au calcul du MND.

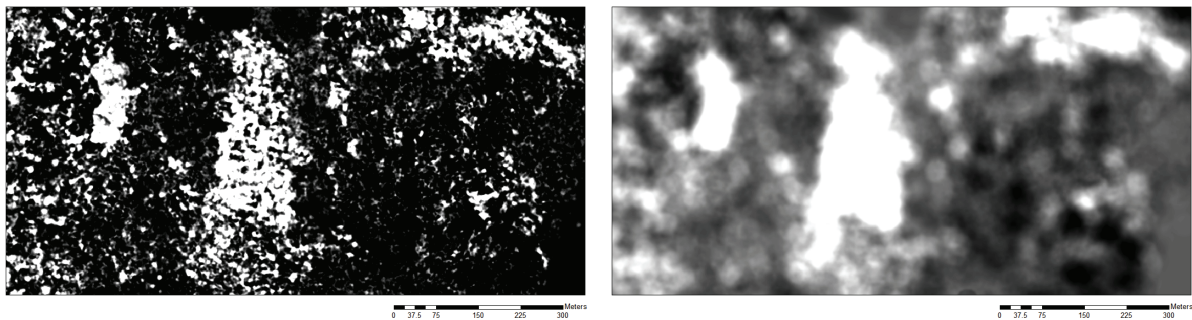


Figure 10.5. Comparaison entre le MND brut (à gauche) et le MND ayant été filtré par le filtre statistique médian (à droite). Le rayon de la fenêtre mobile mesure 20 [m].

Source de données: MNS-MNT-MO; © 2001 Données de la mensuration officielle (www.swisstopo.ch) & MNT, MNS; © SITN (www.ne.ch/sitn).

Une classification des pixels du MND permet ensuite d'extraire 3 niveaux d'intensité des dégâts, sur la base de l'amplitude des différences entre les situations 2001 et 2007:

- **Classe 1:** les différences altimétriques inférieures à 5 [m] (changements non significatifs, forêt non perturbée).
- **Classe 2:** les différences altimétriques comprises entre 5 et 12 [m] (dégâts diffus).
- **Classe 3:** les différences altimétriques supérieures à 12 [m] (dégâts concentrés).

Le choix des valeurs est empirique et dépend principalement de la résolution initiale des modèles, du type de couvert forestier (structure horizontale, âge des peuplements) ainsi que du nombre de mois ou d'années séparant leurs acquisition. Le filtre de convolution appliqué au MND avant le processus de classification améliore notablement la lisibilité du résultat et permet la délimitation de classes d'intensité des dégâts plus homogènes.

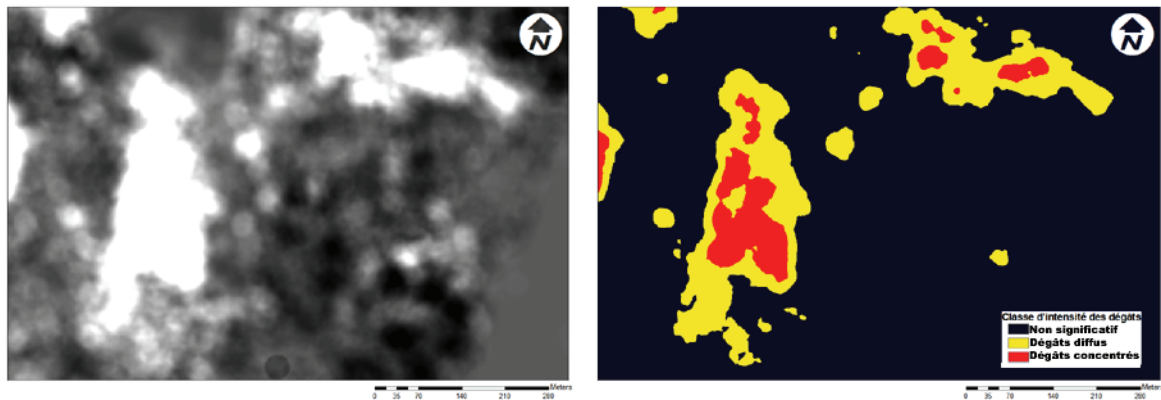


Figure 10.6. Classification du MND en trois catégories.

Source de données: MNS-MNT-MO; © 2001 Données de la mensuration officielle (www.swisstopo.ch) & MNT, MNS; © SITN (www.ne.ch/sitn).

Les classes 1 et 2 délimitant les secteurs ayant subi des dégâts diffus ou concentrés sont ensuite vectorisées. Afin de gagner en lisibilité, les surfaces identifiées comme dégâts diffus et ayant une superficie à 250 [m²] sont encore éliminées. Les petites surfaces de classes 3 sont conservées, sachant qu'elles sont susceptibles de délimiter des coupes d'arbres isolés.

10.5. APPLICATION AU SITE FORESTIER DE LA COMMUNE DE BOUDRY

La figure 10.7 illustre une comparaison entre la cartographie des dégâts calculée par l'approche LiDAR et celle réalisée par l'inventaire de terrain.

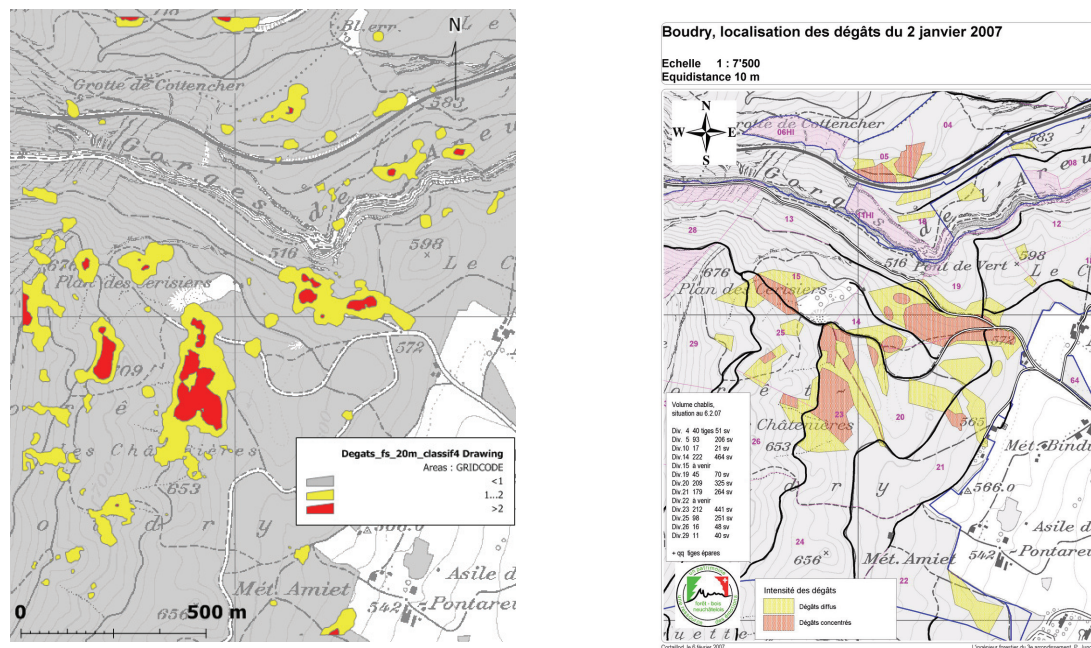


Figure 10.7. Comparaison entre la cartographie issue de la méthodologie LiDAR (à gauche) et celle issue d'une investigation de terrain par le forestier (à droite).

D'emblée, on peut observer que la concordance entre les deux cartographies est bonne. Les principaux

secteurs cartographiés par les forestiers ont été géographiquement bien identifiés par l'approche LiDAR sur le MND. La distinction entre les classes d'intensité s'avère cependant plus délicate. Tout d'abord, la délimitation des dégâts diffus s'avère difficile par LiDAR, sachant qu'il s'agit de secteurs sur lesquels la présence d'une couverture plus ou moins dense peut masquer les dégâts touchant le sous-étage. La réalisation de profils dans le nuage de points bruts a cependant permis de confirmer que la disparition des grands arbres ou groupement d'arbres étaient matérialisés par des secteurs à haute intensité (dégâts concentrés - classe 3 sur la cartographie issue du LiDAR), alors que les secteurs de moyenne intensité (dégâts diffus - classe 2) correspondaient bien à un réarrangement de la canopée suite à une perturbation plus locale (figure 10.8).

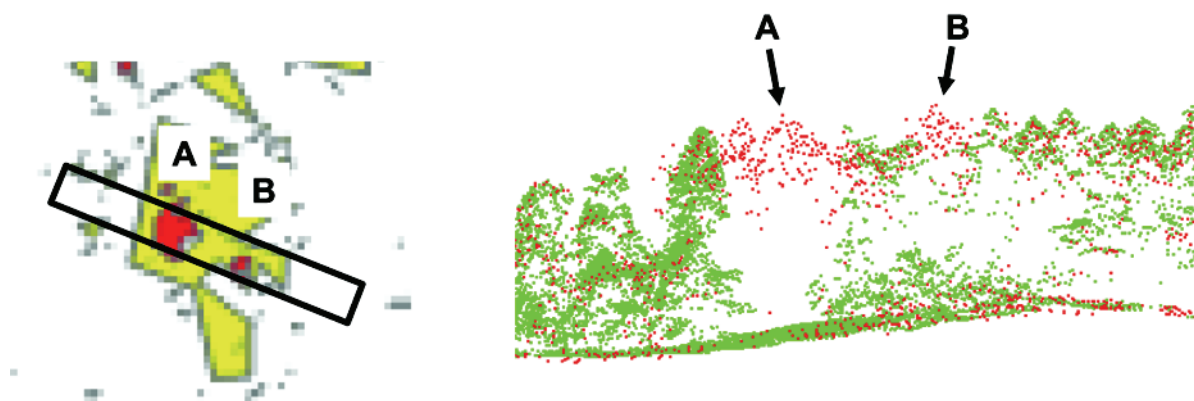


Figure 10.8. Réalisation d'un profil dans le nuage de points bruts, afin d'identifier plus finement l'origine des différences relevées sur le MND. A gauche, illustration du profil à travers les secteurs de dégâts concentrés (en rouge) et diffus (en jaune). A droite, le profil dans le nuage de points bruts: en rouge les données relatives à la campagne 2001, en vert celles de 2007.

Source de données: MNS-MNT-MO; © 2001 Données de la mensuration officielle (www.swisstopo.ch) & MNT, MNS; © SITN (www.ne.ch/sitn).

La superposition de la couche des chablis créée par le forestier avec le MND brut a également permis de constater une excellente corrélation entre la localisation des arbres couchés et les fortes variations identifiées par les zones claires sur le modèle (figure 10.9).

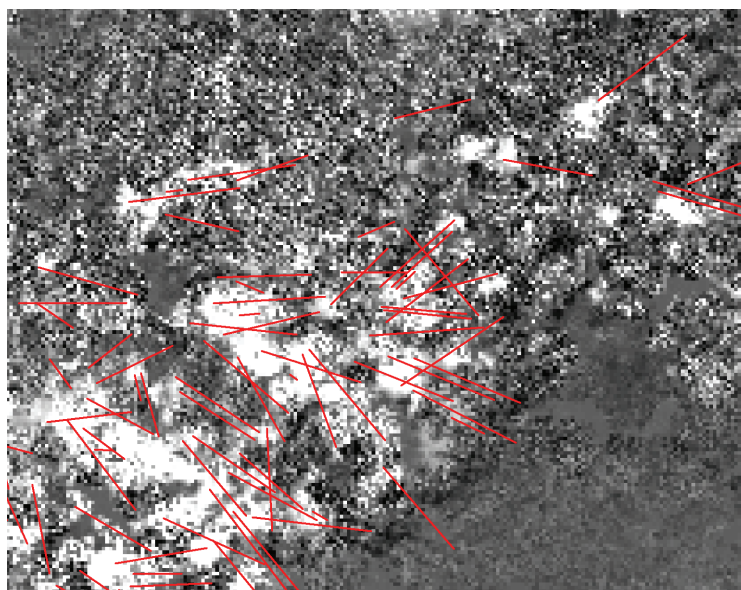


Figure 10.9. Superposition des chablis cartographiés par les forestiers avec le MND brut.

Source de données: MNS-MNT-MO; © 2001 Données de la mensuration officielle (www.swisstopo.ch) & MNT, MNS; © SITN (www.ne.ch/sitn).

Quelques erreurs évidentes ont cependant été identifiées. Elles sont principalement dues à certaines caractéristiques du relief qui ont induit une mauvaise classification du MNT. On peut distinguer deux types d'erreur:

- **Les erreurs de type I**, qui se produisent lorsque des points bruts au sol sont classifiés comme objet de surface. La figure 10.10 illustre la mauvaise classification d'un bloc de rochers au bord des voies de chemin de fer. Classé comme appartenant au terrain en 2007 (en vert sur le profil), cette structure a été totalement éliminée du MNT 2001 (en rouge sur le profil). Ces différences ne sont d'ailleurs pas forcément des erreurs au sens stricte du terme, mais peuvent simplement venir de divergences dans la définition même du MNT.



Figure 10.10. Erreur de type I résultant de la mauvaise classification d'un bloc de rocher en bordure de chemin de fer. A gauche l'orthophoto; à droite un profil dans le nuage de points bruts regroupant les données 2001 (en rouge) et 2007 (en vert).

© SITN (www.ne.ch/sitn). MNS-MNT-MO: © 2001 Données de la mensuration officielle (www.swisstopo.ch)

- **Les erreurs de type II**, qui se produisent lorsque des objets de surface sont classifiés comme points au sol. La figure 10.11 illustre une mauvaise classification du MNT 2007. En effet, les paramètres de la routine de classification automatique des points bruts du MNT n'étant pas spécifiquement adapté à la situation particulière du relief local très escarpé, des arbres présents dans la pente abrupte n'ont pas été classés comme objets de surface. Ce type d'erreur est notable et se retrouve fréquemment lors des études en pays montagneux comme la Suisse. Une attention toute particulière doit donc être portée pour le choix d'une méthode de classification optimal (cf. chapitre 1, paragraphe 1.6: Méthodes de classification des données brutes).



Figure 10.11. Erreur de type II résultant de la mauvaise classification dans un secteur très escarpé. A gauche l'orthophoto; à droite un profil dans le nuage de points bruts regroupant les données 2001 (en rouge) et 2007 (en vert).

© SITN (www.ne.ch/sitn). MNS-MNT-MO: © 2001 Données de la mensuration officielle (www.swisstopo.ch)

D'autres secteurs, nettement délimités sur la base de notre approche, mais non reportés par le forestier, correspondent simplement à des coupes réalisées dans le cadre des travaux courants de gestion.

10.6. SYNTHÈSE ET CONCLUSION

Les études diachroniques en milieu forestier touchent des applications très variées comme: la quantification de la croissance des peuplements, le calcul de l'accroissement, l'évaluation des dégâts causés par les incendies, les avalanches, les chutes de pierre ou encore les forts coups de vents, sujet de l'analyse proposée. Si l'acquisition périodique de données LiDAR sur de vastes territoires ne se justifie pas systématiquement, une couverture plus ciblée, selon les circonstances, constitue un excellent moyen pour acquérir rapidement des informations riches et précises. Un système LiDAR comme Scan2map est par exemple étudié pour répondre spécifiquement à de tels besoins (Skaloud et al., 2006).

La méthodologie présentée repose sur la création d'un MND qui révèle les différences altimétriques entre deux situations espacées dans le temps. D'une manière générale, la première étape clé pour la délimitation des surfaces touchées par la tempête consiste à éliminer le bruit du MND, tout en préservant et facilitant la délimitation des secteurs concrètement touchés. La solution proposée consistant à additionner l'action d'un filtre gaussien (sur le MND source) avec un filtre statistique (sur le MND) offre une double action bénéfique pour améliorer le rendu et les propriétés du MND. La classification du MND filtré, qui constitue la seconde étape clé du processus, offre une certaine marge de manoeuvre à l'opérateur. Ce dernier est ainsi en mesure d'adapter les valeurs seuils à la situation en procédant par itération. Il est alors possible de trouver les meilleurs paramètres pour obtenir des délimitations pas trop morcelées.

La comparaison du résultat obtenu avec la cartographie issue d'une campagne de terrain a permis de juger de la bonne délimitation des dégâts concentrés. En revanche, les secteurs de dégâts diffus, révélant des variations plus nuancées, montre une corrélation moins convaincante. Il faut cependant prendre en compte deux éléments. Tout d'abord, l'étude de terrain permet de reporter comme dégâts diffus les secteurs touchés en sous-bois, mais dont la strate dominante est presque intacte. L'approche LiDAR n'apporte qu'une vue d'en haut donc ne vont pas être en mesure de révéler systématiquement de telles configurations. Ensuite, la cartographie forestière utilisée pour la validation, contrairement à l'approche LiDAR, ne prend pas en considération les coupes de gestion qui se sont déroulées entre 2001 et 2007. Une cartographie précise de ces interventions durant la période séparant les deux vols permettrait de corriger le résultat.

Cette étude a aussi permis de juger de l'importance de connaître les propriétés de chacun des modèles utilisés: le système lidar exploité, les paramètres de vol (saison, fréquence d'échantillonnage des mesures) et surtout la méthodologie utilisée pour la classification du MNT. Ces informations permettent notamment d'assurer la bonne cohérence entre des modèles altimétriques lidar acquis à des années différentes et ainsi expliquer certaines caractéristiques du MND.

Dans la mesure où les modèles LiDAR requis sont à disposition, la méthode proposée est rapide à mettre en place et facilement reproductible. Il y aura ainsi un gain de temps évident pour le forestier. Les résultats présentés dans ce chapitre prouvent que la méthodologie est suffisamment sensible pour identifier fidèlement les secteurs très touchés. Une première délimitation est ainsi en mesure de répondre aux premiers besoins d'intervention, ainsi qu'à la planification des travaux (évacuation du bois). Une bonne connaissance du terrain reste cependant une condition essentielle pour le calibrage des traitements et la bonne interprétation des résultats.

Une estimation quantitative du volume de bois touché, reposant sur la délimitation des dégâts, constitue un développement méthodologique intéressant. Une approche similaire à celle développée dans le chapitre 9 permettrait par exemple d'obtenir une estimation du gros bois touché.

CONCLUSION

La connaissance de l'état actuel et des récents changements de la couverture du sol sont des éléments essentiels pour la gestion et l'aménagement des forêts. Les méthodes habituelles d'investigation, qui se limitent couramment à une information en deux dimensions dérivée de l'image aérienne, sont généralement coûteuses en temps et en argent. Si elles reposent sur le savoir-faire d'un nombre restreint de personnes, elles deviennent même difficilement reproductibles. Dans ce contexte, les données acquises par télémétrie laser sont intéressantes et innovantes à plus d'un titre pour la recherche dans le domaine forestier. En plus d'une modélisation fine du relief, elles offrent une représentation de la végétation à différentes échelles spatiales et en 3 dimensions. Alors qu'un MNT à très haute résolution permet d'analyser les caractéristiques géomorphologiques, et ainsi identifier de nombreux éléments géographiques d'orientation et d'organisation, le calcul d'un MNH révèle une situation précise des lisières et informe sur la position géographique et la hauteur des arbres qui composent la strate dominante. Une étude minutieuse du nuage de points bruts permet encore d'extraire une information précieuse sur la structure verticale du couvert.

Le présent travail de recherche repose sur une démarche essentiellement empirique. Les méthodes développées relèvent de la valorisation des modèles altimétriques LiDAR pour dériver une information synthétique et normalisée, qui offre un éclairage original et objectif de la forêt. A travers une sélection de cas d'étude, le potentiel des modèles LiDAR pour compléter, faciliter ou remplacer certaines pratiques de gestion est évalué. Les différentes contributions abordent successivement l'estimation des propriétés élémentaires du couvert forestier, le calcul d'indicateurs statistiques portant sur l'analyse et la distribution des hauteurs de points bruts, et finalement l'automatisation de statistiques et de cartographies thématiques plus spécifiquement liées à un processus de gestion (Figure C.1).

Afin de compléter les prospections, une analyse diachronique esquisse les possibilités offertes par l'exploitation conjointe de deux modèles altimétriques acquis sur un même secteur, mais à des dates différentes.

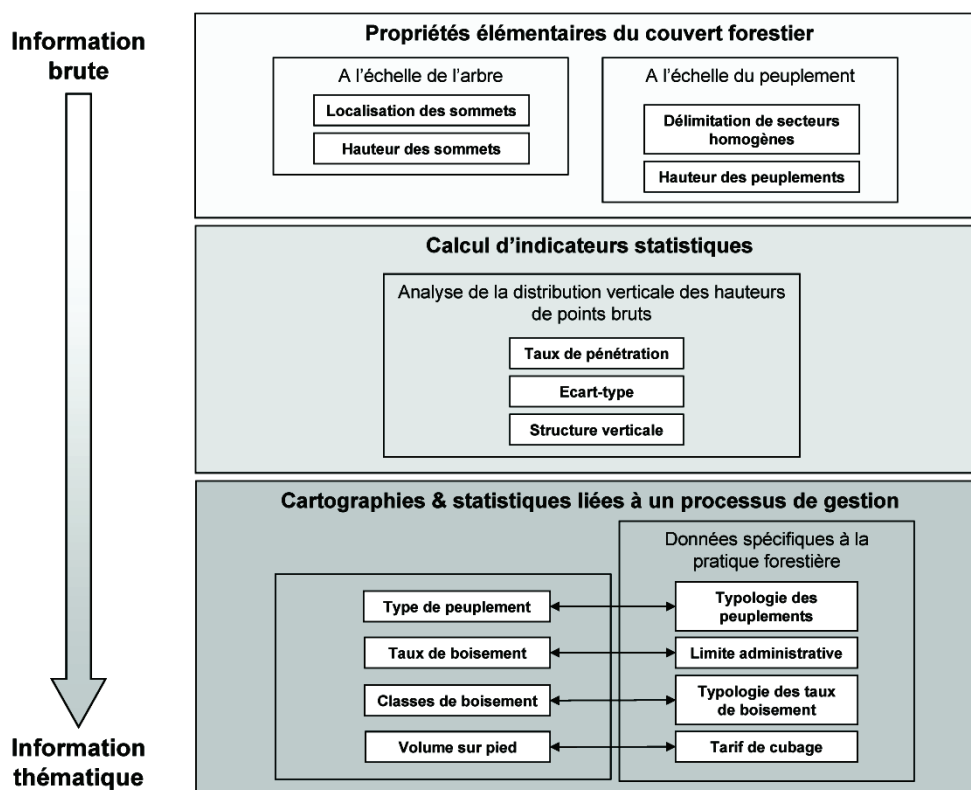


Figure C.1. Résumé des différentes contributions méthodologiques abordées.

SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

Dans leur ensemble, les méthodes proposées dans cette étude produisent une série d'indicateurs qui apportent une information homogène et objective. La subjectivité se réduit à un choix de paramètres à l'intérieur d'une série d'opérations structurées. Les méthodes sont ainsi facilement reproductibles et la précision des résultats en adéquation avec la thématique forestière.

Le choix du format des données LiDAR (nuage de points ou grille) dépend de l'objectif visé, mais aussi des ressources matérielles et logicielles à disposition. Un MNH en mode image (grille) a l'avantage de pouvoir être analysé par une gamme d'outils d'analyse relativement large. L'adaptation de traitements courants (filtrage, segmentation) permet notamment l'extraction d'arbres individuels, l'attribution d'une hauteur, la délimitation automatique de peuplements ou la comparaison de deux modèles successifs. Un modèle altimétrique en nuage de points (format vecteur), où chaque mesure enregistrée est matérialisée par un triplet de coordonnées, offre quant à lui un complément d'information relatif à la structure verticale de la végétation. Leur manipulation est cependant plus complexe et implique une connaissance détaillée de la qualité des conditions d'acquisition (saison, système de mesure, etc.).

Comme la figure I.2 du chapitre d'introduction le suggère, les méthodes développées et évaluées dans cette recherche peuvent se ranger en deux catégories: les méthodes fondamentales et les méthodes combinées.

Les méthodes fondamentales portent sur la détermination des caractéristiques élémentaires à l'échelle de l'arbre et du peuplement. Elles reposent essentiellement sur l'adaptation d'algorithmes et de traitements existants et déjà bien connus (références à d'autres travaux de recherche spécifiques). Sur les différentes solutions proposées (tableau C.1), les contributions proposant une démarche originale concernent

l'extraction des arbres remarquables, l'estimation d'une hauteur dominante de peuplement et l'analyse de la structure verticale par un découpage discret des hauteurs de points bruts.

Méthodes	Opérations clés		Paramètres critiques
Localisation des sommets	A	Calcul des maxima locaux	Taille de la fenêtre d'analyse ($3*3[m^2]$ - $5*5[m^2]$ - $7*7[m^2]$)
Détermination des hauteurs individuelles - Extraction des arbres remarquables	A	Seuillage de l'histogramme des hauteurs de sommets (méthode de l'histogramme)	Hauteur seuil ($H_{seuil} = 34 [m]$)
	A	Seuillage des hauteurs de points bruts (méthode des percentiles)	Hauteur seuil ($99^{ème}$ percentile)
Délimitation des peuplements	A	Segmentation du MNH	Facteur d'échelle (taille des objets) ($F_{echelle} = 40$) Facteurs d'hétérogénéité (forme des objets) ($F_{spectral/spatial} = 0.7/0.3$) $F_{compacité/sinuosité} = 0.7/0.3$)
Hauteur des peuplements	A	Sélection des sommets dominants (méthode des sommets)	Nombre de sommets à considérer (10% du nombre total)
	A	Seuillage des hauteurs de points bruts (méthode des hauteurs de points bruts)	Hauteur seuil (H_{max} ou H_{Q99})
Structure verticale des peuplements ^a - Découpage discret de la strate verticale	A	Analyse du découpage vertical des hauteurs de points bruts	Nombre de divisions verticales (3 à 7 divisions)
			Seuil de remplissage significatif (5 à 20%)

Tableau C.1. Synthèse des opérations clés et des paramètres critiques pour relatifs aux méthodes fondamentales. Opération d'analyse: (A). Les informations en italique dans la colonne dédiée aux paramètres critiques donnent un exemple indicatif des valeurs types utilisées dans cette étude (forêts mixtes et pâturages boisés de l'arc lémanique).

- a. Les indicateurs relatifs au taux de pénétration et à l'écart-type des hauteurs de points bruts ne sont pas décrits dans ce tableau, sachant qu'ils reposent sur un calcul direct (sans paramétrage).

La localisation des sommets, l'estimation des hauteurs individuelles, de même que la délimitation des peuplements et l'estimation de leur hauteur, s'appuient essentiellement sur l'analyse d'un MNH raster. En fonction de la résolution spatiale de ce dernier, ainsi que de la structure du couvert analysé (mélange forestier, forme des couronnes, etc.), une opération de filtrage du MNH (opération initiale) correctement dosée s'impose. Le pourcentage d'arbres correctement localisés par la méthode des maxima locaux dépend de la qualité du modèle source et d'un choix judicieux des paramètres d'analyse. La principale limitation réside cependant dans l'incapacité de distinguer les structures forestières simples des structures plus complexes (étagées). Les indicateurs dérivés de l'analyse statistique des hauteurs de points bruts se présentent donc comme un complément d'information très utile. Sous la forme de cartographies thématiques ou d'histogrammes, ces indicateurs apportent aux gestionnaires une information précieuse sur les

variations relatives des différentes structures qui composent certaines forêts.

Les méthodes composées qui traitent plus directement d'une problématique de gestion, combinent une ou plusieurs méthodes fondamentales en y injectant une information de nature purement forestière. Les approches proposées, de par leur forte relations à des problématiques de nature plus helvétiques, constituent des contributions davantage originales. Les méthodes composées traitées dans cette recherche sont résumées dans le tableau C.2.

Méthodes		Opérations clés	Paramètres critiques
Cartographie des peuplements	C	Analyse de la statistique des hauteurs de points bruts	Seuils de la médiane (Dépend de la typologie des peuplements forestiers) Valeur de l'écart-type (Seuil: 7 [m])
Etude du taux de boisement	A	Seuillage du boisé	Hauteur seuil du boisé ($H_{boisé} = 2 [m]$)
	C	Modélisation du diamètre de couronne	Fonction du modèle de couronne ($R = 0.1117 H + 2.6894$)
Classification de la densité du boisé	I	Calcul de la carte de densité des sommets	Résolution spatiale (D) de la grille résultante ($D = 10 [m]$) Taille du rayon (R) définissant le voisinage ($R = 45 [m]$)
	C	Seuillage des classes de densité	Seuils de densité (Table de correspondance entre la valeur des pixels de la carte de densité des sommets et les catégories de taux de boisement définies pour chaque phytocénose)
	A	Filtrage (majoritaire) de la carte de densité	Nombre d'itérations (2 à 4 itérations)
Estimation du volume sur pied	C	Sélection des peuplements types	Fonction de régression (H-DHP) $H = a \ln(DHP) + b$
Evolution d'une forêt	A	Filtrage (median) du MND	Rayon du voisinage ($R = 20 [m]$)
	A	Seuillage des intensités	Hauteur seuil des différentes classes d'intensité définies (5 [m] (diffus) - 12 [m] (sévères))

Tableau C.2. Synthèse des opérations clés et des paramètres critiques pour relatifs aux méthodes composées. Une distinction est faite entre les opérations initiales (I), d'analyse (A) ou de calibration (C). Les informations en italique dans la colonne dédiée aux paramètres critiques donnent un exemple indicatif des valeurs types utilisées dans cette étude (forêts mixtes et pâturages boisés de l'arc lémanique).

Deux thématiques touchent plus particulièrement l'étude des pâturages boisés, à savoir la détermination du taux de boisement et la classification de la densité du couvert. Les pâturages boisés, soumis à une gestion mixte, agricole et forestière, présentent des structures diversifiées (souvent dominées par une seule strate), qui se prêtent bien à l'analyse par les modèles altimétriques LiDAR. La localisation automatique des arbres composant ces milieux dynamiques, ainsi que l'estimation de leurs hauteurs, se révèlent être une source d'information très utile et facilement exploitable.

L'estimation des volumes sur pied reposant sur le dénombrement des tiges débouche inévitablement sur une prédiction biaisée qui ne considère que la strate dominante et néglige les strates inférieures. La nécessité de compléter la méthode par une intégration de la structure verticale du couvert, de même que des données de référence recueillies in situ, s'impose.

La figure C.2 offre une vue synthétique des méthodes développées dans cette recherche.

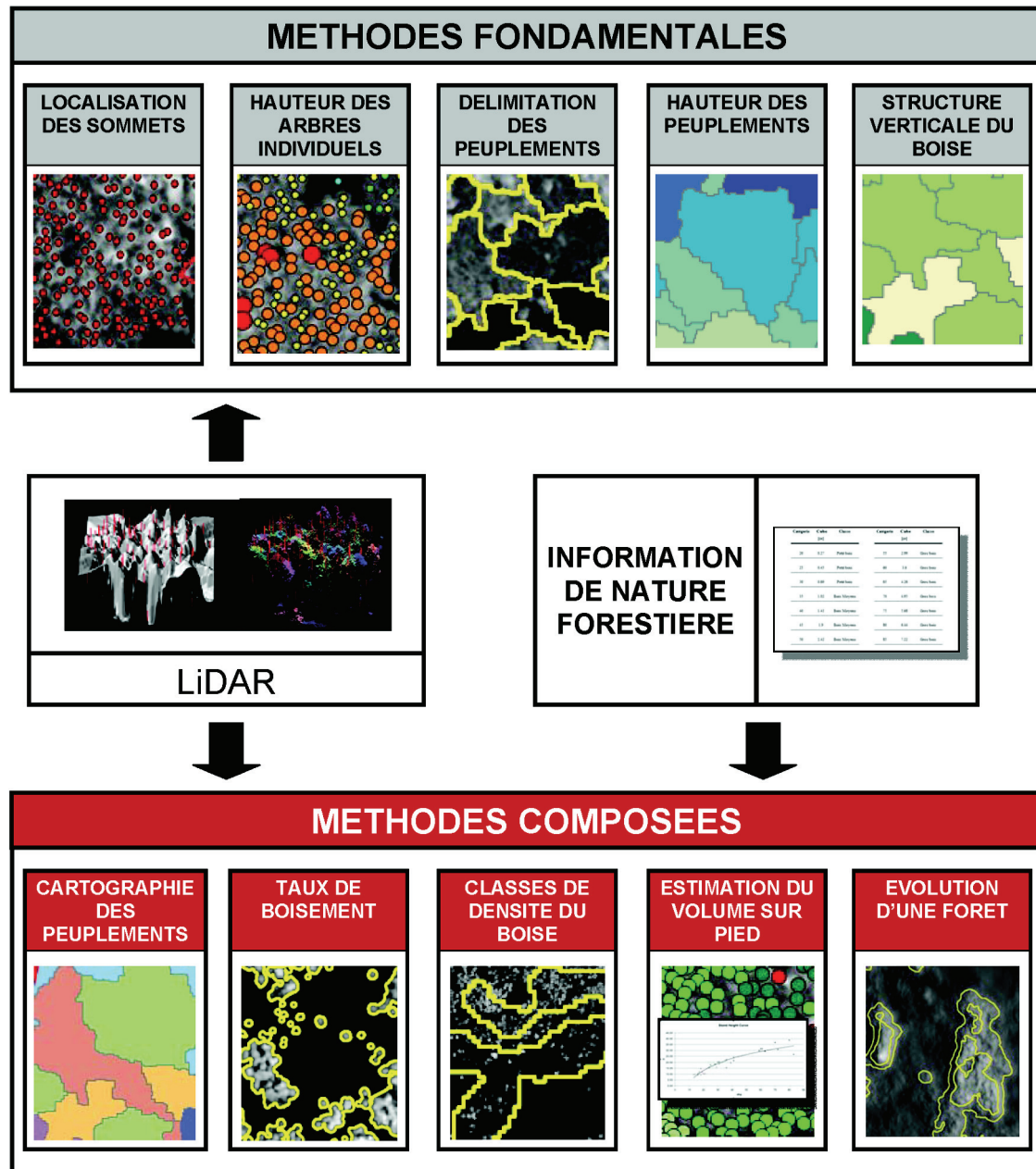


Figure C.2. Synthèse des méthodes fondamentales et composées développées.

Finalement, le tableau C.3 propose une synthèse des thématiques forestières considérées dans cette étude. Pour chacune d'elles, les objectifs de la méthode, de même que l'utilisabilité de la solution développée pour le gestionnaire des forêts, sont reportés.

Thématique forestière	Objectifs de la méthode	Utilisabilité ^a
Détermination des caractéristiques élémentaires à l'échelle de l'arbre	Localiser les sommets des arbres Estimer la hauteur individuelle des arbres Extraire les arbres remarquables	Dénombrement des individus de la strate dominante. Estimation des hauteurs individuelles (dans la précision des mesures collectées sur le terrain). Localisation des arbres émergents.
Détermination des caractéristiques élémentaires à l'échelle du peuplement	Calculer les limites des peuplements Estimer la hauteur des peuplements	Délimitation préliminaire des peuplements, par l'analyse du toit de la canopée. Attribution d'une hauteur dominante du couvert.
Analyse et classification des peuplements	Analyser la structure verticale par le calcul d'indicateurs: - taux de pénétration des impulsions - écart-type des hauteurs de points bruts - découpage discret de la strate verticale - type de peuplement forestier	Cartographie de la fermeture de la canopée. Etude de la stratification verticale du couvert. Cartographie préliminaire des peuplements.
Détermination du taux de boisement	Calculer le taux de boisement à l'intérieur d'un périmètre donné	Délimitation automatique des limites de peuplement et localisation des arbres individuels. Estimation d'une surface de couvert à l'échelle d'un pâturage.
Classification de la densité du couvert	Délimiter des classes de densité du couvert forestier	Cartographie de la structure horizontale du boisé. Base cartographique pour le prézonage.
Estimation du volume sur pied	Estimer le volume sur pied	Estimation du volume sur pied de la strate dominante.
Etude diachronique	Délimiter des secteurs de boisé modifiés entre deux situations	Cartographie automatique des coupes liées à la gestion ou des chablis conséquents à une catastrophe naturelle.

Tableau C.3. Résumé des thématiques abordées.

- a. La notion d'utilisabilité informe sur le potentiel des données LiDAR à être utilisées par les experts forestiers dans les tâches courantes de gestions

LE LiDAR EN CONSOLIDATION DE LA DÉMARCHE DU FORESTIER

La technologie LiDAR ouvre la voie à une mise en valeur plus globale, plus exploratoire de l'état et de l'évolution des peuplements. En dépit de ces qualités, et dans la mesure où l'intensité du signal retour n'est pas pris en considération, les systèmes LiDAR aéroportés se limitent à des mesures altimétriques. Si l'utilisation d'une plate-forme aéroportée facilite une acquisition rapide sur de vastes étendues, elle complique passablement le processus de calibrage des données et la vue d'en haut limite l'interprétation des objets masqués par la canopée. La reconnaissance des essences est également très limitée sur l'unique analyse de la structure des couronnes. En futaie mélangée et irrégulière, les restitutions LiDAR ne suffisent ainsi pas à contrôler le rendement soutenu, l'intégrité écologique ainsi que la multifonctionnalité de la forêt. De ce fait, l'acquisition d'informations rapides, précises, à un coût abordable pose les systèmes LiDAR aéroportés non pas en concurrents, mais en compléments aux méthodes plus traditionnelles. La solution la plus optimale pour acquérir une connaissance détaillée et à jour des couverts forestiers passe ainsi par la combinaison de la technologie LiDAR aéroporté, de l'analyse d'orthophotos et d'inventaires terrestres (figure C.3). L'orthophoto haute résolution informe sur le type d'arbre et l'état sanitaire des tiges de l'étage supérieur. Les relevés terrestres apportent des précisions sur les espèces et surtout permettent l'acquisition d'informations plus détaillées, qui peuvent aussi se révéler utiles pour le calibrage des données issues du LiDAR.

En pratique, le gestionnaire des forêts doit assurer des tâches de sylviculture, souvent expérimentales, avec des missions d'entretien et d'exploitation de la forêt, ainsi que des tâches liées à l'aménagement, portées essentiellement sur l'observation et le recensement. C'est précisément dans cette seconde catégorie que la technologie LiDAR est novatrice, dans la mesure où elle permet la collecte d'informations objectives et homogènes sur le territoire. Les outils d'analyse spatiale permettent ensuite d'élaborer une série d'indicateurs en relation avec la pratique forestière. La complémentarité entre les différents indicateurs proposés constitue une plate-forme exploratoire de l'état et de l'évolution des forêts (planification forestière). Ces éléments peuvent s'avérer précieux pour fixer des buts à atteindre pour les différentes parties de la forêt, planifier des mesures à prendre pour atteindre les buts fixés ou encore contrôler des résultats obtenus.

La gestion des forêts restant une affaire de spécialistes, les méthodes proposées par cette étude se composent généralement d'une série d'opérations sur lesquelles l'expert forestier est en mesure d'agir par un ajustement adapté des paramètres clés. Les indicateurs auront d'autant plus de valeur et de signification que l'expert forestier aura pu participer activement à son élaboration. Alors que les opérations initiales ne nécessitent pas ou peu d'appréciation du praticien, les opérations d'analyse et de calibrage, plus proches des préoccupations de gestion, impliquent une connaissance certaine du terrain et des enjeux (figure C.3).

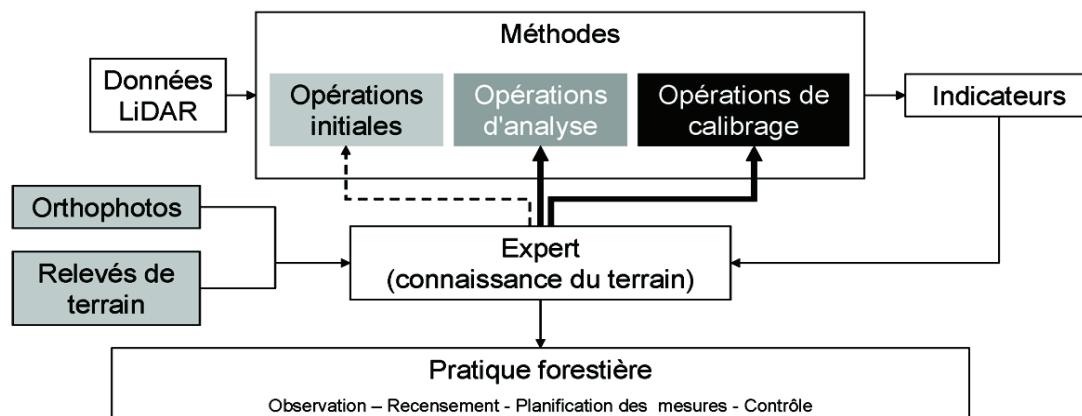


Figure C.3. Implication de l'expert forestier dans le calcul des indicateurs.

Plus concrètement, le jeu de méthodes proposé repose sur des bases objectives et robustes, mais nécessitent l'intervention plus ou moins marquée de l'expert pour la paramétrisation des opérations et l'interprétation judicieuse des indicateurs. Les cartographies et indicateurs produits permettent alors de gagner du temps en favorisant des interventions sur le terrain plus ciblées et plus poussées. Ces dernières restant nécessaires pour compléter l'investigation par la connaissance plus subjective, mais bien plus riche, du forestier.

PERSPECTIVES

A travers les sept thématiques forestières abordées dans cette thèse (tableau C.3), une attention particulière a été portée à la reproductibilité des méthodes développées. Dans cette optique, plusieurs sites présentant des caractéristiques distinctes ont été traités en parallèle. De nouvelles investigations restent cependant souhaitables, afin d'approfondir encore la robustesse des opérations mises en place. A titre d'exemple, la localisation des sommets sur de nouveaux mélanges d'essences, ou l'estimation du volume sur pied de structures forestières plus variées (jeunes peuplements, plantations, etc.), permettrait de généraliser les méthodes proposées.

Les quatre indicateurs étudiés au chapitre 6, et qui reposent sur l'analyse des points bruts, attestent du potentiel des données altimétriques LiDAR pour extraire une information sur la structure verticale du couvert. La manière de coupler pratiquement cette information avec les autres méthodologies présentées, comme par exemple l'estimation du volume de bois, n'a pas été abordée. Une nouvelle étude pourrait mettre en valeur ce potentiel prometteur.

Cette étude s'est volontairement limitée à l'analyse et l'exploitation de la nature altimétrique des données LiDAR. L'information spectrale, tirée notamment de l'imagerie couleur ou proche infrarouge, offre cependant des renseignements essentiels pour la reconnaissance des essences ou encore l'analyse de l'état sanitaire des forêts. L'intégration systématique de l'imagerie aérienne pour compléter ou optimiser les méthodes proposées dans ce travail est sans conteste une perspective à approfondir. Depuis un certain temps d'ailleurs, des travaux portent spécifiquement sur l'exploitation de la complémentarité entre les données LiDAR et l'imagerie est en augmentation (Schenk & Csatho, 2002; St-Onge et al. 2008; Wang et al., 2008).

Finalement, la relation entretenue tout au long de ce projet avec les experts forestiers montre que la profession est également majoritairement intéressée par une utilisation plus systématique de données LiDAR. Un effort doit cependant encore être fait afin d'une part de mieux communiquer le potentiel d'exploitation de ces données et d'autre part de proposer des outils qui facilitent leur emploi. Même si

l'utilisation des logiciels SIG tend à se généraliser dans les agences gouvernementales chargées de superviser et de gérer la forêt, le développement d'applications spécifiquement dédiées au traitement des données LiDAR sont très rares, voire absentes. A ce titre, il y a certainement un intérêt à consolider les premiers développements mis en place avec l'application ASPL, afin de proposer un nouvel outil paramétrable, facile d'accès et en mesure d'apporter une information interprétable et utile au forestier.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

Ackerman, F. 1996. Airborne Laser Scanning for Elevation Models, *Geomatics Info Magazine*, Vol. 10, No. 10, pp. 24-25.

Ackerman, F. 1999. Airborne Laser Scanning – Present Status and Future Expectations -, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 54, No. 2-3, pp. 64-67.

Ackermann, N. & Stebler, Y. 2007. Acquisition et traitement de MNT laser pour la gestion forestière et les dangers naturels. Rapport d'étude, Section des Sciences et Ingénierie de l'Environnement, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, mai 2007.

Aldred, A.H. & Bonnor, G.M. 1985. Application of airborne lasers to forest surveys. Information Report PI-X-51, Canadian Forestry Service, Petawawa national Forestry Institute, 62pp.

Alharthy, A., Bethel, J., Mikhail, E., M. 2004. Analysis and accuracy assessment of airborne laserscanning system. In *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Istanbul, Turkey, Vol. XXXV, part B2, pp. 144-149.

Andersen, H.-E., McGaughey, R.J., Carson, W.W., Reutebuch, S.E., Mercer, B., Allan, J. 2003. A comparison of forest canopy models derived from LIDAR and InSAR data in a Pacific Northwest conifer forest. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Dresden, Germany: Vol. XXXIV, Part 3/W13.

Arnaud, M. & Emery, X. 2000. Estimation et interpolation spatiale: méthodes déterministes et méthodes géostatiques, Hermès Éditeur, France, Paris, Science Publications, 2000.

Artuso, R., Bovet, S., Streilein, A. 2003. Practical methods for the verification of countrywide terrain and surface models. *Proceedings of the ISPRS working group III/3 workshop XXXIV-3/W13. 3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data*. Dresden, Germany, 8-10 October 2003.

Axelsson, P. 1999. Processing of laser scanner data algorithms and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, 1999, pp. 138 -147.

B

Baltsavias, E.P. 1999a. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54(2-3):199-214, 1999.

Baltsavias, E. P. 1999b. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2-3):164--198, July 1999.

Barbezat, V. & Jacot, J. 1998. The CLAPA project: automated classification of forest with aerial photographs. In *Proceedings of the International Forum on Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry*, Victoria, BC, Feb. 10-12, 1998, Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Center, 345-356.

Barbezat, V. 2002. Aspects forestiers du zonage et de la dynamique du taux de boisement en pâturage boisé Jurassien. Diss. ETHZ Nr.14892: 154 S.

Bellian, J.A., Kerans, C., Jennette, D.C. 2005. Digital outcrop models: applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modelling. *Journal of Sedimentary Research* 75, 166-176.

Belton, D. & Lichti, D. 2006. Classification and segmentation of terrestrial laser scanner point clouds using local variance information, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (Part 5) (2006), pp. 44–49.

Biolley, H. 1920. L'aménagement des forêts par la méthode expérimentale et spécialement la méthode du contrôle. In : « Henry Biolley. Oeuvre écrite ». Supplément aux organes de la Société forestière suisse no 66, 1980, p. 51-135.

Böhm, J., Haala, N., Becker, S. 2007. Facade Modelling for Historical Architecture. In: *Proceedings of the XXI International CIPA Symposium*, Athens, Greece, October 1-6, 2007, 6 pages.

Bonn F. & Rochon, G. 1996. Précis de télédétection, Volume 2: Applications thématiques, Edit. AUPELF-UREF, Presses Universitaires du Québec, Montréal.

Brandtberg, T., Warnera, T. A., Landenbergerb, R. E., McGrawb. J. B. 2003. Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America. *Remote Sensing of Environment*, 85(3), pp. 290-303.

Bretar, F. 2006. Couplage de Données Laser Aéroporté et Photogrammétriques pour l'Analyse de Scènes Tridimensionnelles. Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, juin 2006.

Brunner, T. 2006. Derivation of forest lines from LIDAR-Data, Projet d'étudiant, Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich.

C

Caloz, R. & Collet, C. 2001. Précis de Télédétection. Volume 3: Traitements numériques d'images de télédétection. Presses de l'Université du Québec et AUPELF-UREF, Sainte-Foy et Montréal, 386 pp.

Carson, W.W., Anderson, H.-E., Reutebuch, S.E., McGaughey, R.J. 2004. LiDAR applications in forestry – an overview -. In Proceedings of ASPRS Annual Conference. Denver, USA.

Chauve, A., Durrieu, S., Bretar, F., Pierrot-Deseilligny, M., Puech, W. 2007. Processing full-waveform LiDAR data to extract forest parameters and digital terrain model: validation in an alpine coniferous forest, Proc. of the ForestSat Conference, Montpellier, France.

Chen, Q., Baldocchi, D.D., Gong, P. 2006. Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint LiDAR data. Photogram. Engineer. Remote Sensing 72:923–932.

D

Definiens AG, 2006a. Definiens Professional 5 Reference Book. Definiens AG, Munich, 122 pp.

Definiens AG, 2006b. Definiens Professional 5 User Guide. Definiens AG, Munich, 249 pp.

Deillon, Y. 2000. Projet SAU – Attribution des travaux de la phase 1 sur le périmètre RE2 -, Article technique, Info D+M 3/2000.

Diedershausen, O., Koch, B., Winacker, H. 2004. Automatic Segment and Characterisation of Forest Stand Parameters using Airborne LIDAR data, Multispectral and Fogis Data, Proceedings of the ISPRS working group VIII/2, Freiburg, pp. 208-212.

E

F

Farron, L. 2004. La foret neuchâteloise en raccourci. Service cantonal des forets. République et canton de Neuchâtel, Département de la gestion du territoire.

G

Gachet, G. & Junod, P. 2007. Apports et perspectives de la technologie LIDAR pour la pratique forestière, Journal forestier suisse.

Gallandat J.-D., Gillet F., Havlicek E., Perrenoud A. 1995. Typologie et systématique phytoécologique des pâturages boisés du Jura suisse. Rapport final de mandat. Univ. Neuchâtel.

García, R., Suárez, J.C., Patenaude, G. 2007. Delineation of individual tree crowns and stand parameters using LiDAR in the Scottish woodlands. The European Information Society. Leading the Way with Geoinformation. Series: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Fabrikant, Sara Irina; Wachowicz, Monica (Eds.) 2007, XVII, 486 p. ISBN: 978-3-540-72384-4.

- Gillet, F. & Ferrez, Y. 2006. Typologie simplifiée des pâturages boisés de la chaîne du Jura. Projet Interreg IIIa Suisse-France pour la gestion intégrée des paysages sylvo-pastoraux, non publié, 11 pp.
- Glennie, C.L., 2007. Rigorous 3D Error Analysis of Kinematic Scanning LIDAR Systems. *Journal of Applied Geodesy*, Vol. 1, pp. 147-157.
- Golay F., Gachet G., Pointet, A. 2003. Etude préalable pour la détermination du taux de boisement à l'aide des modèles numériques d'altitude de la mensuration officielle (MNT-MO et MNS-MO). Rapport d'étude. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, LaSIG.
- Gonçalves, G. 2006. Analysis of interpolation errors in urban digital surface models created from Lidar data. Accepted for publication in the 7th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences. 5 - 7 July, Lisbon, Portugal.
- Goodwin, N. R., Coops, N. C., Culvenor, D. S. 2006. Assessment of forest structure with airborne lidar and the effects of platform altitude. *Remote Sensing of Environment*, 103, pp. 319-330.
- Gougeon, F.A. 1995a. A crown-following approach to the automatic delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 21: 274–284.
- Gougeon, F.A. 1995b. A system for individual tree crown classification of conifer stands at high spatial resolution. Pages 635-642 in *Proc. 17th Can. Symp. Rem. Sens.* Saskatoon, Saskatchewan, Canada, June 13-15, 1995.

H

- Harding, D. J. 2000. BOREAS Scanning Lidar Imager of Canopies by Echo Recovery (SLICER): Level-3 Data. CD-ROM. Available by special arrangement with Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. [<http://www.daac.ornl.gov>].
- Hirata, Y., Sato, K., Shibata, M., Nishizono, T. 2003. The capability of helicopter-borne laser scanner data in a temperate deciduous forest. In: *ScandLaser Proceedings*, pp. 175-180.
- Holmgren J., Nilsson M., Olsson H. 2003. Estimation of tree height and stem volume on plots using airborne laser scanning *For. Sci.*; 49: 419-428.
- Hyypä J., Inkinen M. 1999. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner Photogram. *J. Finland* 1999; 16: 27-42.
- Hyypä, J. 2000. Feasibility for estimation of single tree characteristics using laser scanner. *Proceedings of IGARSS'2000 Symposium*, July 24-28, 2000, Honolulu, Hawaii, USA, 3 pp.
- Hyypä J., Pyysalo U., Hyypä H., Samberg A. 2000. Elevation accuracy of laser scanning-derived digital terrain and target models in forest environment. 20th EARSeL Symposium and Workshops, Dresden, Germany.
- Hyypä, J., Kelle, O., Lehikoinen, M., Inkinen, M. 2001a. A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, 969-975.
- Hyypä, J., Schardt, M., Haggrén, H., Koch, B., Lohr, U. Scherrer, H.U., Paananen, R., Luukkonen, H.,

Ziegler, M., Hyypä, H., Pyysalo, U., Friedländer, H., Uutera, J., Wagner, S., Inkinen, M., Wimmer, A., Kukko, A., Ahokas, E., Karjalainen, M. 2001b. HIGH-SCAN: The first European-wide attempt to derive single-tree information from laserscanner data. *The Photogrammetric Journal of Finland*, 17(2):58-68.

Hyypä, J., Hyypä, H., Litkey, P., Yu, X., Haggrén, H., Rönholm, P., Pyysalo, U., Juho Pitkänen, J., Maltamo, M. 2004. Algorithms and Methods of Airborne Laser-Scanning for Forest Measurements. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol XXXVI, 8/W2, Freiburg, Germany.

I

J

Junod, P. 2007. La forêt: ses vertus, ses utilités, ses valeurs; sa gestion, sa culture, Présentation Power-Point du 23 avril 2007 dans le cadre du cours «Conservation des sols et gestion des écosystèmes» à l'EP-FL, Pascal Junod, ingénieur forestier du 3ème arrondissement, CH-2016 Cortaillod.

Jerez, M., Dean, T. J., Cao, Q. V., Roberts, S. D. 2005. Describing leaf area distribution in Loblolly pine trees with Johnson's SB function. *Forest Science*, 51, 93-101.

K

Kaasalainen, S., Ahokas, E., Hyypä, J., Suomalainen, J. 2005. Study of surface brightness from backscattered laser intensity: Calibration of laser data. *IEEE GeoScience and Remote Sensing Letters*, 2, pp. 255- 259.

Katzenbeisser, R. 2002. Echo Intensity. Technical Note, TopoSys GmbH Technical note, <http://www.toposys.de/pdf-ext/Engl/TNIntensity.pdf> Germany 2002.

Katzenbeisser R. 2003. Echo Detection. Technical Note, TopoSys GmbH Technical note, http://www.toposys.de/pdfext/Engl/echo_detect3.pdf Germany 2003.

Katzenbeisser, R. 2003. About the Calibration of LiDAR Sensors. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIV(3/W13).

Kilian, J., Haala, N., and Englich, M. 1996. Capture and evaluation of airborne laser scanner data. *ISPRS*, **31**, Part 3, 383-388.

Kini, A. & Popescu, S.C. 2004. TreeVaW: a versatile tool for analyzing forest canopy LIDAR data: A preview with an eye towards future. In CD-ROM Proceedings, ASPRS 2004 Fall Conference, Kansas City, Missouri, Sept. 12-16, 2004.

Kraus, K., Pfeifer, N. 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 53, 1998.

L

Lang, S. & Langanke, T. 2006. Object-based mapping and object-relationship modeling for land use classes and habitats. PFG - Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformatik , 1/2006, 5-18.

Leckie, D., Gougeon, F., Hill, D., Quinn, R., Armstrong, L., Shreenan, R. 2003. Combined high-density lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis. Canadian Journal of Remote Sensing 29, No. 5, pp. 633-649.

Lee, H., S. & Younan, N., H. 2003. DTM extraction of LiDAR returns via adaptive processing. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 41, no. 9, pp. 2063–2069, Sept. 2003.

Lee, A.C. & Lucas, R.M. 2007. A LiDAR-derived canopy density model for tree stem mapping in Australian forests. Remote Sensing of Environment, 111, 493-518.

Lemmens, M. 2007. Product Survey: Airborne Lidar Sensors. GIM International, February, Volume 21, Issue 2, pp. 24-27.

Levick S.R. & Rogers, K.H. 2006. LiDAR and object-based image analysis as tools for monitoring the structural diversity of savanna vegetation, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part XXX.

Lim, K., Treitz, P., Groot, A., St-Onge, B. 2001. Estimation of individual tree heights using 659 LiDAR remote sensing, Proceedings of the Twenty-Third Annual Canadian Symposium on Remote 660 Sensing, Quebec, August 20-24, 2001.

Lim, K., Treitz P., Wulder, M., St-Onge B., Flood, M. 2003. LiDAR remote sensing of forest structure. Progress in Physical Geography. 27:88-106.

Lovell, J.L., Jupp, D.L.B., Culvenor, D.S., Coops, N.C. 2003. Using airborne and ground-based ranging lidar to measure canopy structure in Australian forests. Canadian Journal of Remote Sensing 29 607–622.

Luethy, J., Stengele, R. 2005. 3D mapping of Switzerland challenges and experiences. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science 36 (Part 3/W19), 42-47.

M

Mallet, C., Bretar, F. 2008. Full-Waveform Topographic Lidar: State-of-the-Art. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, article à paraître.

Mallet C., Chauve, A., Bretar, F. 2008. Analyse et traitement d'ondes lidar pour la cartographie et la reconnaissance de formes: Application au milieu urbain. RFIA (Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle), Amiens, France, janvier 2008.

Maltamo, M., Eerikainen, K., Pitkanen, J., Hyypä, J., & Vehmas, M. (2004). Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions. Remote Sensing of Environment, 90, 319-330.

- Maltamo, M., Packalén, P., Yu, X., Eerikäinen, K., Hyyppä, J. and Pitkänen, J. 2005. Identifying and quantifying structural characteristics of heterogeneous boreal forests using laser scanner data. *For. Ecol. Man.* 216(1-3): 41-50.
- Maltamo, M., Hyyppä, J., Malinen, J. 2006a. A comparative study of the use of laser scanner data and field measurements in the prediction of crown height in boreal forests, *Scandinavian Journal of Forest-Research* 21: 231-238.
- Maltamo, M., Malinen, J., Packalén, P., Suvanto, A., Kangas, J. 2006b. Nonparametric estimation of stem volume using airborne laser scanning, aerial photography, and stand-register data, *Canadian Journal Forest Research* Vol. 36: 426-436 (2006).
- Maclean, G.A., Krabill, W.B. 1986. Gross-merchantable timber volume estimation using an airborne LI-DAR system. *Can. J. Remote Sensing*, 12, 7-18.
- Mei, C. & Durrieu, S. 2004. Tree crown delineation from digital elevation models and high resolution imagery, In.: *Proceedings of ISPRS working group VIII/2, Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment*, Freiburg, Germany 03-06 October 2004, pp 218-223.
- Miéville-Ott, V., Barbezat, V. 2005. Perception du pâturage boisé: résultats d'un sondage effectué au Communal de la Sagne NE. - Schweiz. Z. Forstwes. 156, 1: 1-12. http://wslar.epfl.ch/perso/mieville-ott_barbezat_2005.pdf.
- Morin, K. 2002. Calibration of airborne laser scanners, The University of Calgary, 135 pp.
- Morsdorf, F., Meier, E., Allgöwer, B. and Nüesch, D. 2003. Clustering in Airborne Laser Scanning Raw Data for Segmentation of Single Trees, *Proceedings of the ISPRS working group III/3 workshop "3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data"* Dresden, Germany 8-10 October 2003, ISSN 1682-1750 VOLUME XXXIV, PART 3/W13.
- Morsdorf, F., Frey, O., Meier, E., Itten, K.I., Allgöwer B. 2006. Assessment on the Influence of Flying Height and Scan Angle on Biophysical Vegetation Products derived from Airborne Laser Scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*.
- Murakami, H., Nakagawa, K., Shibata, T., Iwanami, E. 1998. Potential of an airborne laser scanner system for change detection of urban features and orthoimage development. In: *IAPRS, Stuttgart, Germany*, Vol. XXXII, Part 4, pp. 422-427.

N

- Næsset, E. 1997. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 52: 49-56.
- Nelson, R.F., W.B Krabill and J. Tonelli. 1988. Estimating forest biomass and volume using airborne laser data: *Remote Sensing of Environment*. 24: 247-267.
- Næsset, E., & Økland, T. 2002. Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 79, pp. 105-115.
- Naesset, E. 2004. Accuracy of forest inventory using airborne laser scanning: evaluating the first nordic

full-scale operational project. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19(6): 554-557.

Naesset, E., Gobakken, T. et al. 2004. Laser scanning of forest resources: The Nordic experience. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19(6): 482-49.

Nelson, R.F., Krabill, W.B., Maclean, G.A. 1984. Determining forest canopy characteristics using airborne laser data. *Remote Sensing of Environment* 15: 201–212.

Nilsson, M. 1996. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne LiDAR system. *Remote Sensing of Environment* 56: pp. 1-7.

O

P

Persson, Å., Holmgren, J., Söderman, U. 2002. Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 2002, 68, 925-932.

Pitkänen, J., Maltamo, M., Hyypä, J. 2004. Adaptive methods for individual tree detection on airborne laser based canopy height model. *International Archives of Photogrammetry, remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI- 8/W2.

Pitkänen, J. 2001. Individual tree detection in digital aerial images by combining locally adaptive binarization and local maxima methods. *Canadian Journal of Forest Research* 31(5): 832-844.

Popescu, S.C. 2002, *Estimating Plot-Level Forest Biophysical Parameters Using Small-Footprint Airborne Lidar Measurements*, Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 155 pp.

Popescu, S.C., Wynne, R.H., Nelson, R.F. 2002. Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size, *Computers and Electronics in Agriculture*, 37(1-3):71-95 diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol. 29, no. 5., pp. 564-577.

Popescu, S.C., Wynne, R.H., Nelson, R.E. 2003. Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol. 29, no. 5., pp. 564-577.

Popescu, S.C. & Wynne, R.H. 2004. Seeing the trees in the forest: using lidar and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 70(5): 589-604.

Pyysalo, U. 2006. Single tree feature extraction from airborne laser scanner data applying vector models Thesis. Department of Surveying. Helsinki, University of Technology, pp. 78.

Pyysalo, U. & Hyypä, H., 2002. Reconstructing Tree Crowns from Laser Scanner Data for Feature Extraction. *ISPRS Commission III Symposium*, Graz, Austria.

Q

R

République et canton du Jura, 2001. Directive 15.1, Surface agricole utile et limites forestières, Service de l'aménagement du territoire, Section cadastre et géomatique.

Reutebuch, S. E., McGaughey, R. J., Andersen, H.-E., Carson, W. W. 2003. Accuracy of a high-resolution LIDAR terrain model under a conifer forest canopy. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(5), 527-535.

Reutebuch, S.E., Andersen, H.E., McGaughey, R.J. 2005. Light Detection and ranging (LiDAR): An emerging tool for multiple resource inventory. *Journal of Forestry*, 103, pp. 286-292.

Riaño, D., Meierc, E., Allgöwer, B., Chuvieco, E., Ustin, S.L. 2003. Modelling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modelling. *Remote Sensing of Environment* 86(2003):177-186.

Riedo, M. 2007. Une image aérienne de 20 milliards de pixels pour Neuchâtel, *Flash Informatique Spécial*, été 2007, EPFL, pp. 50-56.

Riegl. 2006. 2D laser scanner LMS-Q240. (www.riegl.com).

Roth, R.B. & Thompson, J. 2008. Practical application of multiple-pulse in the air (MPiA) lidar in large area surveys, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 37 (Part 1) (2008), pp. 183-188.

Ruiz, A., Kornus, W., Talaya, J., Colomeret, J.L. 2004. Terrain modelling in an extremely steep mountain: A combination of airborne and terrestrial LiDAR, In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXV, Part B2, Istanbul, Turkey.

S

Schnadt, K. & Katzenbeisser, R. 2004. Unique airborne fiber scanner technique for application-oriented LiDAR products. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXVI-8/W2:19-23.

Schaer, P., Skaloud, J., Vallet, J. 2003. Géoréférencement direct des images par GPS-INS: Approche rigoureuse pour le calibrage des excentricités angulaires, *Géomatique Suisse*, 8/2003, pp. 440-445.

Schaer, P., Skaloud, J., Landtwing, S., Legat, K. 2007. Accuracy Estimation for Laser Point Cloud Including Scanning Geometry. In *5th International Symposium on Mobile Mapping Technology*, Padua, Italy, May 29-31.

Schenk, T. & Csatho, B. 2002. Fusion of LIDAR data and aerial imagery for a more complete surface description. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 34(3A), 310-317.

- Schütz, J.-Ph. 1990. Sylviculture 1 principes d'éducation des forêts, Presses polytechniques et universitaires romandes. République et Canton de Neuchâtel, Département de la gestion du territoire, Service des forêts 2001: Principes sylviculturaux. Chapitre 5 du Plan d'aménagement forestier.
- SFFN. 1975. Guide d'aménagement. Canton de Vaud, Service des forêts, de la faune et de la nature. Document interne.
- Sithole, G. & Vosselmann, G. 2003. Comparison of Filtering algorithms. Proceedings of the ISPRS workgroupIII/3 workshop Dresden, pp. 71 – 78.
- Sithole, G. 2005. Segmentation and Classification of Airborne Laser Scanner Data. Ph.D. Thesis. Publications on Geodesy, 59. Publication of Netherlands Geodetic Commission. ISBN 90 6132 292 8. 184 pp.
- Skaloud, J. & Vallet, J. 2002. High Accuracy Handheld Mapping System for Fast Helicopter Deployment, Joint International Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, ISPRS Comm. IV, Ottawa, Canada, July 9-12.
- Skaloud, J., Vallet, J., Keller, K., Veyssiere, G., Koelbl, O. 2005. HELIMAP: Rapid large scale mapping using handheld LiDAR/CCD/GPS/INS sensors on helicopters, Proceedings ION GNSS 2005, Long Beach, CA, USA, 13–16 September, pp. 2461–2467.
- Skaloud, J., Vallet, J., Keller, K., Veyssière, G., Kölbl, O. 2006: An eye for landscapes – Rapid aerial mapping with handheld sensors. GPS World 17(5): 26-32.
- Skaloud, J., Lichti, D., 2006. Rigorous approach to bore-sight self calibration in airborne laser scanning. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 61 (2006) 47-59.
- Smith, S.L, Holland, D.A., Longley, P.A. 2004. The Importance of Understanding Error in LiDAR Digital Elevation Models. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 2004, XXXV, 996-1001.
- Société vaudoise de sylviculture. 2006. Agenda forestier.
- Solodukhin, V.I., Zukov, A.Ya., Mazugin, I.N. 1977. Possibilities of laser aerial photography for forest profiling. Lesnoe Khozyaistvo (Forest Management), 10, pp. 53-58 (in Russian).
- Song, J.H., Han, S.H., Yu, K., Kim, Y. 2002. Assessing the Possibility of Land-cover Classification Using Lidar Intensity Data, IAPRS, 9-13 September, Graz, 34, 4.
- St-Onge, B. 1999. Topographic effects on the texture of high resolution forest stand images measured by the semivariogram. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 65:923-936.
- St-Onge, B., Dufort, J., Lepage, R. 2000. Measuring Tree Height Using Scanning Laser Altimetry, Comptes rendus du 22e Symposium Canadien de Télédétection, 21-25 août, Victoria, B.C., pp. 425-432.
- St-Onge, B. 2000. Estimating individual tree heights of the boreal forest using airborne laser altimetry and digital videography». Workshop of ISPRS WG III/2 & III/5 : Mapping surface structure and topography by airborne and spaceborne lasers. 7-9.11.1999 La Jolla (Californie): Int. Arch. of Photog. & Rem. Sens. Vol. 32 no 3-W14 p. 179-184.
- St-Onge, B. & Achaichia, N. 2001. Measuring forest canopy height using a combination of lidar and aerial photography data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 34(3/W4), pp. 131 – 137.

St-Onge, B. 2004. L'altimétrie laser à balayage. *Revue Internationale de Géomatique*.14:531-558.

St-Onge, B. & Vepakomma, U. 2004. Assessing forest gap dynamics and growth using multi-temporal laser-scanner data, *Proceedings of the Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment — Instruments, Processing Methods and Applications International Conference, Fribourg im Breisgau, 3–6 Octobre 2004 (2004)*, pp. 173–178.

St-Onge, B., Vega, C., Fournier, R. A., Hu, Y. 2008. Mapping canopy height using a combination of digital stereo-photogrammetry and lidar, *International Journal of Remote Sensing*, 29: 3343-3364.

Suárez, J.C., Ontiveros, C., Smith, S., Snape, S. 2004. The use of airborne LiDAR and Aerial Photography in the estimation of individual tree heights in forestry'. Presented at the 7th AGILE Conference on Geographic Information Science – Heraklion, Greece, 30th April to 1st of March 2004.

Suárez, J.C., Ontiveros, C., Smith, S., Snape, S. 2005a. Use of airborne LiDAR and Aerial Photography in the estimation of individual tree heights in forestry. *Computers and Geosciences*. Vol 31, issue 2, March 2005, pp 253-262.

Suárez, J.C., Smith, S., Bull, G., Malthus, T., Donoghue, D., Knox, D. 2005b. The use of remote sensing techniques in operational forestry. *Quarterly Journal of Forestry*, Vol. 99, No. 1, pp. 31-42.

T

Terrasolid, 2005. User's Guide Terrascan, www.terrasolid.fi.

Tiede, D. et al. 2004. Object-based semi automatic mapping of forest stands with Laser scanner and Multispectral data. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVI-8W2, Freiburg, pp. 328-333.

Tiede, D. et al. 2005. A full GIS-based workflow for tree identification and delineation using laser scanning. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVI, Part 3/W24, Vienna, pp. 9 – 14.

U

V

Vallet, J., Skaloud, J. 2004. Development and Experiences with A Fully-Digital Handheld Mapping System Operated From A Helicopter, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Istanbul, Vol. XXXV, Part B, Commission 5.

Vepakomma, U., St-Onge, B., Kneeshaw, D. 2006. Gap dynamics of the eastern boreal forests using multi-temporal lidar data, *Proc. of the workshop Eastern CANUSA 2006, 19-21 October 2006, Québec*.

Vietti-Viola, C. 2007. Exploitation de données LIDAR à haute résolution pour la foresterie, Travail de master, EPFL, Laboratoire de SIG, Lausanne.

Vosselman, G. 2000. Slope based filtering of laser altimetry data. In Proceedings of IAPRS (Amsterdam, The Netherlands) ,XXXIII, Part B3, p935-942.

Vu, T.T., Matsuoka, M., Yamazaki, F., Tokunaga, M. 2004. Airborne Laser Scanner data for change detection: An efficient method to update building database in urban areas. In: Proceeding of the Symposium on application of real-time information in disaster management, Japanese Society of Civil Engineers, pp. 55-60, June 2004, Tokyo, Japan.

W

Wang, Z., Boesch, R., Ginzler, C. 2008. Integration of high resolution aerial images and airborne LIDAR data for forest delineation. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 37, B7: 1203-1207.

Wehr, A. & Lohr, U. 1999: Airborne laser scanning - an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, 68-82.

Weinacker, H., Koch, B., Heyder, U., Weinacker, R. 2004. Development of filtering, segmentation and modelling modules for lidar and multispectral data as a Fundament of an automatic forest inventory system. Thies, Koch, Spieker, Weinacker (Ed.). *Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment*. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol XXXVI-8/W2.

Werdenberg K. et Hainard P. 2000. Les paysages végétaux du canton de Genève. Un survol complet des milieux naturels genevois. Une carte de la végétation du canton au 1/25.000, Série documentaire no 34 des Conservatoire et Jardin botaniques de la Ville de Genève.

Wouters, P., Lorent, V. 2000. Mesurer la hauteur d'un arbres. *Silva Belgica*: fiche numéro 5, 107, N° 2/ 2000.

Wulder, M., Niemann, K.O., Goodenough, D.G. 2000a. Local maximum filtering for the extraction of tree locations and basal area from high spatial resolution imagery. *Remote Sensing of Environment*, 73, pp. 103-114.

Wulder, M., Magnussen, S., Harding, D., Boudewyn, P., Seemann, D. 2000b. Stability of surface LIDAR height estimates on a point and polygon basis, *Proceedings of the 22nd Symposium of the Canadian Remote Sensing Society, "Remote Sensing and Spatial Data Integration: Measuring, Monitoring and Modelling"*, Victoria, British Columbia, August 20th to 25th, 2000, pp. 433-438.

X

Y

Yu, X. et al. 2006. Change detection techniques for canopy height growth measurements using airborne laser scanner data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 72(12): pp. 1339-1348.

Yu, X., Hyypä, J., Kaartinen, H., Maltamo, M., 2004. Automatic Detection of Harvested Trees and Determination of Forest Growth Using Airborne Laser Scanning. *Remote Sensing of Environment* 90 (4), pp. 451-462.

Z

Textes de loi:

LFo, Loi fédérale du 4 octobre 1991 sur les forêts, 921.0.

OFo, Ordonnance du 30 novembre 1992 sur les forêts, 921.01.

LCFo, Loi cantonale du 6 février 1996 sur les forêts, Canton de Neuchâtel. 921.1.

OTerm, Ordonnance du 7 décembre 1998 sur la terminologie agricole et la reconnaissance des formes d'exploitation, 910.91.

Sources internet:

EUroSDR: «Tree extraction project»: www.eurosd.net
(http://www.eurosd.net/2good/index.php?option=com_content&task=view&id=49&Itemid=72)
(octobre, 2008).

FINELTRA, HTRANS: www.swisstopo.ch/fr/basics/geo/system/lv95/ (octobre, 2008).

GLAS: www.csr.utexas.edu/glas/ (octobre, 2008).

LASER: www.futura-sciences.com/fr/definition/t/matiere-1/d/laser_1989/ (octobre, 2008).

LAS Format: <http://www.lasformat.org> (décembre, 2008).

RIEGL: http://www.rali.boku.ac.at/fileadmin/_/H85/H857/workshops/3drsforestry/presentations/8a.1-rieger.pdf (décembre, 2008).

SITG: www.sitg.ch (octobre, 2008).

SVS: <http://forsys.cfr.washington.edu/svs.html> (octobre, 2008).

TERRASOLID: www.terrasolid.fi (octobre, 2008).

VEGETATION CANOPY LIDAR MISSION: www.geog.umd.edu/vcl/vcltext.html (octobre, 2008).

GLOSSAIRE

GPS	<i>Global Positionning System</i> : système de navigation radio, composé de 24 satellites et d'une base terrestre, qui permet de fournir à un abonné sa position précise en trois dimensions (latitude, longitude, altitude), sa vitesse et l'heure.
INS /IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i> (centrale inertielle): appareil de navigation permettant de calculer en temps réel l'évolution du vecteur vitesse, de la position du véhicule à bord duquel il est monté, ainsi que son attitude (roulis, tangage, lacet). Une centrale à inertie est composée de gyroscopes, de capteurs d'accélération et de vitesse angulaire.
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (amplification de la lumière par émission stimulée de radiations): ce dispositif à électrons permet de créer un étroit faisceau de lumière cohérente.
LiDAR	<p>L'acronyme LiDAR est l'abréviation de <i>Light Detection And Ranging</i> par analogie au système plus connu, le RADAR (<i>Radio Detection And Ranging</i>) qui lui s'applique au domaine des micro-ondes. Cette technique de télédétection repose sur l'émission-réception d'une impulsion laser (généralement dans le proche infrarouge). A l'instar de St-Onge (St-Onge, 2004) nous n'avons pas cherché à traduire cet acronyme qui désigne essentiellement le principe de télémétrie laser, mais aussi par extension l'appareil de télémétrie lui-même. L'acronyme LADAR (Laser Detection and Ranging) est aussi utilisé. On distingue deux grandes classes de systèmes LiDAR qui se différencient par le principe d'enregistrement du signal retour (rétrodiffusé):</p> <ol style="list-style-type: none">1. Les systèmes à impulsion enregistrent un à plusieurs échos significatifs (au-delà d'un certain seuil) pour une impulsion laser donnée.2. Les systèmes à échantillonnage d'amplitude sont capables de numériser l'intégralité du signal retour de chaque impulsion laser.

Martelage	Opération où l'on désigne et marque physiquement (par un blanchis) les arbres destinés à être abattus.
MNA	<p><i>Modèle Numérique d'Altitude</i>: représentation de la topographie de la Terre dans un format numérique. Ce terme générique englobe aussi bien les MNT, les MNS que leurs dérivés.</p> <p>En anglais: Digital Elevation Model (DEM).</p>
MNC	<p><i>Modèle Numérique de la Canopée</i>: représentation numérique du territoire (MNS) dans un contexte exclusivement forestier.</p> <p>En anglais: Digital Canopy Model (DCM).</p>
MND	<p><i>Modèle Numérique des différences</i>: représentation numérique du territoire calculée par la soustraction d'un MNH_1 (calculé sur la base de données LiDAR acquises à un temps t_1) à un MNH_2 (calculé sur la base de données LiDAR acquises à un temps t_2). Chaque pixel a pour valeur une information de différence de hauteur.</p>
MNH	<p><i>Modèle Numérique de Hauteur</i>: représentation numérique du territoire calculée par la soustraction du MNT au MNS. Chaque pixel a pour valeur une information de hauteur.</p> <p>En anglais: Digital Height Model (DHM), l'acronyme nDSM (normalized Digital Surface Model) est également utilisé.</p>
MNS	<p><i>Modèle Numérique de Surface</i>: représentation numérique du territoire prenant en compte le terrain et les objets de surface (bâtiments, arbres, ponts, etc.). Chaque pixel a pour valeur une information d'altitude par rapport au niveau de la mer.</p> <p>En anglais: Digital Surface Model (DSM).</p>
MNT	<p><i>Modèle Numérique de Terrain</i>: représentation numérique du territoire «nu» sans les objets de surface. Chaque pixel a pour valeur une information d'altitude par rapport au niveau de la mer.</p>
Point brut	Représentation spatiale (vecteur) d'un triplet de coordonnées LiDAR. On parle de nuage de points bruts lorsqu'une multitude de triplets de coordonnées sont représentés ensemble.
Portée du laser	Distance opérationnelle maximale entre la plate-forme aéroportée (le système LiDAR) et le terrain.
Possibilité	Montant de l'exploitation annuelle admise par l'aménagement.

Raster (format)	Format en mode «image» où l'espace est divisé de manière régulière (en petits rectangles). A chaque petit rectangle, ou pixel, sont associées une ou plusieurs valeurs décrivant les caractéristiques de l'espace. Un modèle numérique d'altitude raster est constitué d'une maille régulière de pixels pour lesquelles une altitude est attribuée. Les modèles sont généralement géoréférencés, ce qui fait que l'on connaît précisément les coordonnées de chaque pixel.
Réserve sur coupe	Arbre conservé sur un peuplement régénéré dans le but d'obtenir un complément de régénération, de protéger la jeune forêt, d'éduquer des très gros bois de grande valeur ou de structurer le paysage. Cette méthode est fréquemment utilisée avec le pin sylvestre, parfois le mélèze, rarement le chêne.
Résilience	Capacité d'un écosystème, d'un habitat, d'une population ou d'une espèce à retrouver un fonctionnement et un développement normal après avoir subi une perturbation importante (facteur écologique).
Réflectance	Rapport de l'intensité du rayonnement réfléchi au rayonnement incident sur une surface. Le suffixe "-ance" indique qu'il s'agit d'une propriété de la surface qui réfléchit le rayonnement.
Sylve	Unité de mesure du matériel sur pied. Une sylve comprend 1 [m ³] de volume tarifaire de boisbrut (masse de bois, écorce incluse jusqu'à des branches d'un diamètre de 7 [cm], sans brindilles, feuilles, aiguilles).
Tarif de cubage	Table donnant le volume d'un arbre à partir d'une seule grandeur mesurée, le plus souvent le diamètre à hauteur de poitrine.
Triage forestier	Etendue de forêt soumise à la surveillance d'un garde.
Unité de mesure laser	Une unité de mesure laser comprend le télémètre à laser pulsé, les optiques, le scanner (qui permet le balayage latéral des impulsions laser) et le système de détection.
Vecteur (format)	Format en mode «objet», où les objets sont représentés par des primitives graphiques (points, lignes, polygones, etc...). Dans un fichier LiDAR vecteur, chaque objet (point brut) peut être décrit, en plus des attributs intrinsèques (géométrie, etc.), par autant d'attributs que nécessaire (définis par l'utilisateur): un identifiant (ID) ou encore la valeur d'intensité du signal retour (I) par exemple. Chaque objet est distribué de façon aléatoire dans l'espace.

ANNEXES

Annexe A. Campagne de terrain: étude des arbres individuels

Afin de bénéficier de données de référence pour évaluer aussi judicieusement que possible l'extraction de variables à l'échelle de l'arbre, une campagne de mesures a été menée le 9 mai 2007. Une série de variables dendrologiques sur un pâturage boisé situé juste en amont du lieu-dit de La Fruitière de Bevaix. Ce site a l'avantage de regrouper sur une surface relativement petite des tiges isolées (feuillus et conifères), ainsi que des petits massifs d'arbres. Si ces derniers ne sont pas entièrement représentatifs de la complexité que l'on est en mesure de trouver dans la majorité des peuplements âgés, ils permettent néanmoins de se rendre compte de la complexité à individualiser correctement des arbres lorsque leurs couronnes sont enchevêtrées. Pour chacun des 92 arbres composant ce secteur, les paramètres suivants ont été observés:

- Position du tronc (visée laser à l'aide d'un prisme positionné à 1.30 [m])
- Hauteur de l'arbre
- Hauteur de la base de la couronne¹
- Diamètre du tronc
- Diamètre de la couronne
- Type d'essence (feuillu ou conifère)

Méthodologie de relevé

Campagne de La Fruitière de Bevaix

La position des troncs, ainsi que les hauteurs d'arbre et de couronne, ont été mesurés avec un tachéomètre Leica TPS 700 Performance Series (station totale). Afin de pouvoir localiser correctement la base et le sommet pour la totalité des arbres du secteur, les mesures ont été réalisées à partir de 3 différentes stations. La détermination de la position de chacune d'elle s'est faite grâce à un GPS Leica 500 muni d'un système AGNES RTK (correction DGPS en temps réel par onde GSM). Depuis chacune des stations, les mesures d'angles et de distances ont été réalisées en relatif selon le schéma illustré à la figure A.1.

1. La hauteur de la base des couronnes a été mesurée à l'embranchement de la branche la plus basse sur le tronc. La branche doit avoir une taille significative et être porteuse de feuilles.

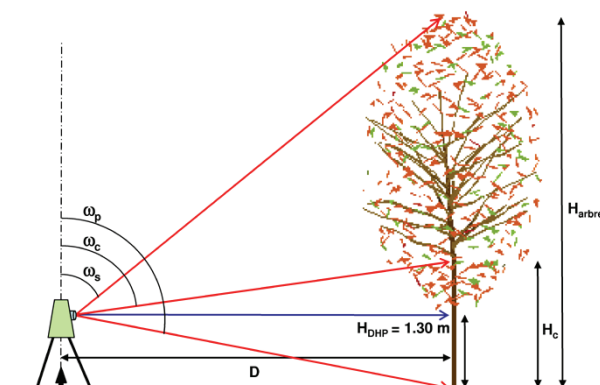


Figure A.1. Schéma des mesures prises avec le tachéomètre.

La position des arbres a ensuite été convertie du système local défini par la station totale dans le système de coordonnées suisse CH1903. La hauteur de couronne ainsi que la hauteur totale de chaque arbre ont été déduites sur la base de la mesure des angles verticaux et de la distance. Le diamètre de la circonférence des troncs a été mesuré à hauteur de poitrine à l'aide d'une chevillère. Le diamètre de couronne a également été mesuré à la chevillère. Il correspond en fait de la moyenne entre deux mesures effectuées perpendiculairement (une mesure parallèle à la pente et l'autre perpendiculaire à la pente). Le résultat des mesures de la campagne se compose d'un ensemble de points géoréférencés correspondant à la position des troncs. A chaque point sont associés les paramètres mesurés (figure A.2).

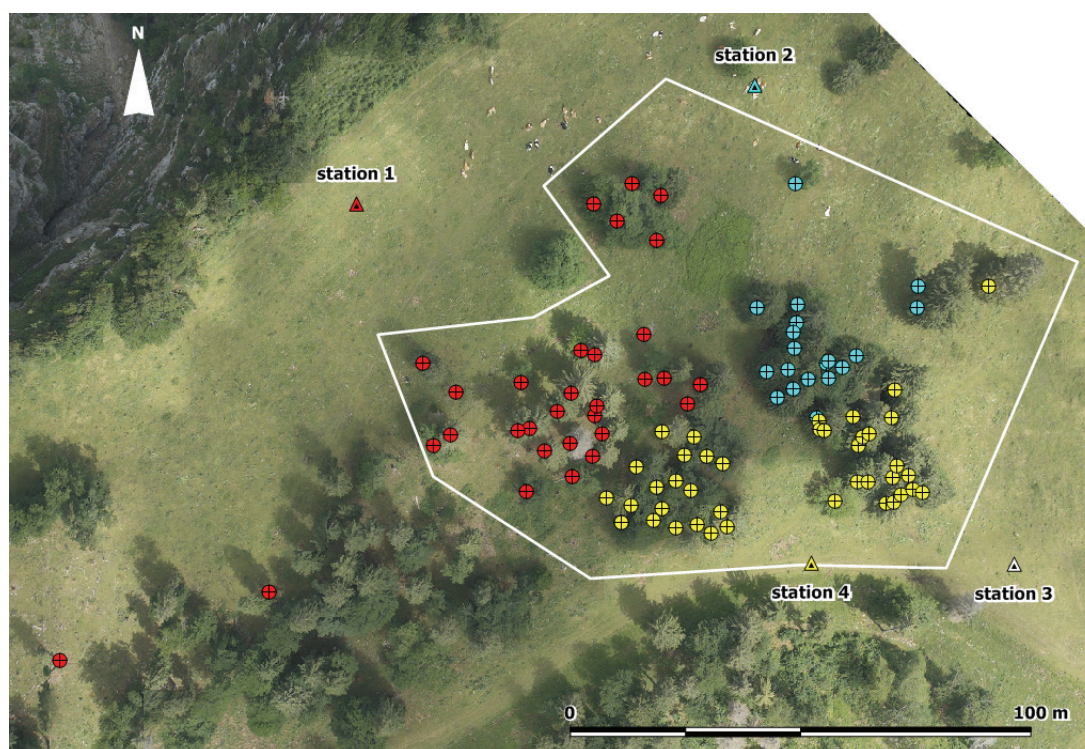


Figure A.2. Schéma des mesures prises avec le tachéomètre. Les arbres sont divisés en trois lots (3 couleurs) selon la position de la station totale lors de la mesure. Deux arbres supplémentaires ont été mesurés hors de la zone de campagne (polygone blanc). Il s'agit de deux conifères remarquables par leur taille et relativement bien isolés.

Une estimation de la précision (écart-type) des différentes mesures est reportée dans le tableau A.1.

Précision de la mesure GPS	5 [cm]
Précision de la mesure de distance au tachéomètre	5 [mm]
Précision du placement du réflecteur	15 - 20 [cm]
Précision des mesures d'angle	1.5 [mgon]
Précision sur la hauteur de couronne et la hauteur totale ^a	1 [m]
Précision sur la mesure du diamètre du tronc	5 [cm]
Précision sur la mesure du diamètre de la couronne ^b	1 [m]

Tableau A.1. Tableau résumant les précisions estimées des mesures.

- La précision de la visée dépend de la visibilité de la cime. La mesure des arbres en arrière plan est généralement plus délicate et doit se faire à travers le feuillage de la première rangée.
- La présence de couronne très asymétriques peut conduire à une précision moins bonne que la valeur d'1 [m] pour quelques cas isolés.

Résultats

Campagne de La Fruitière de Bevaix

Les mesures ont pu être correctement enregistrées et traitées pour 91 arbres. Le secteur est composé de 33% de feuillus - essentiellement des hêtres (*Fagus sylvatica*) et des alisiers blancs (*Sorbus aria*) - et 67% de conifères - sapins blancs (*Abies alba*) et épicéas (*Picea abies*). Les hauteurs des arbres se situent entre 7 [m] et 31 [m], avec une moyenne de 20.6 [m] et un écart-type de 6.1 [m]. Les diamètres à hauteur de poitrine se situent entre 17.5 et 78 [cm], avec une moyenne à 46 [cm] pour un écart-type de 13.1 [cm].

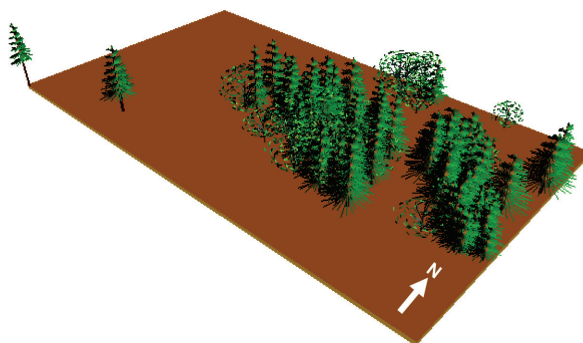


Figure A.3. Modélisation du secteur de la campagne de terrain dans le logiciel SVS (Stand Visualization System)^a. Les paramètres de hauteurs d'arbre, hauteurs de couronnes, diamètres de couronnes et essences correspondent au relevés de terrain.

- Sur la base d'une liste d'attributs judicieusement formatée, SVS permet de créer une représentation réaliste des peuplements, calculer des statistiques et ainsi faciliter la gestion (USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station). <http://for-sys.cfr.washington.edu/svs.html>, octobre 2007.

Les figures A.4 et A.5 présentent les histogrammes de distribution des hauteurs et des diamètres de tronc pour les 91 arbres mesurés lors de la campagne de terrain. On note que la distribution des hauteurs n'est pas tout à fait gaussienne, mais présente un pic pour les hauteurs situées entre 20 et 25 [m]. Ce pic se trouve pour les diamètres de troncs compris entre 40 et 50 [cm].

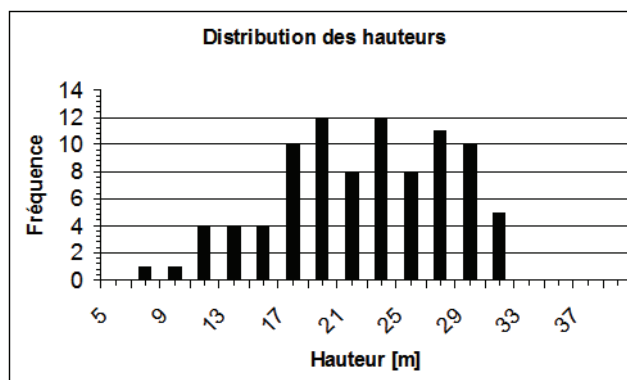


Figure A.4. Histogramme de distribution des hauteurs pour les 91 arbres mesurés lors de la campagne de terrain.

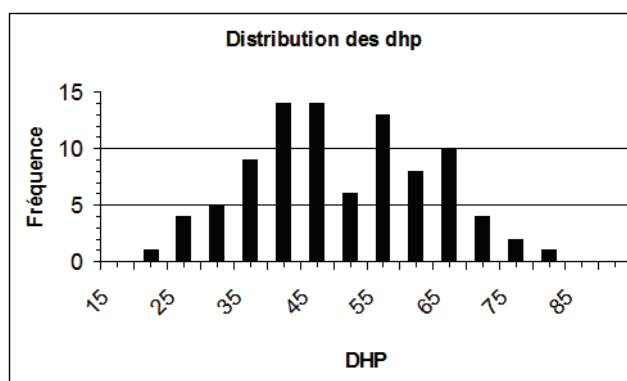


Figure A.5. Histogramme de distribution des dhp pour les 91 arbres mesurés lors de la campagne de terrain.

Annexe B. Campagne de terrain: étude des peuplements

Afin de bénéficier de données de référence pour l'estimation des hauteurs d'arbre en peuplement, ainsi que pour étudier la relation existant entre la hauteur d'un arbre et le diamètre de son tronc à hauteur de poitrine, une campagne de mesures a été menée le 10 mai 2007.

En compagnie de l'ingénieur forestier du 3ème arrondissement du canton de Neuchâtel, Monsieur Pascal Junod, une visite ciblée de chaque type de peuplement a été faite le long du transect forestier traversant les communes de Bevaix et Coratillod. La hauteur pour un échantillon de 30 arbres (12 perchis, 4 arbres en jeune futaie, 6 arbres en futaie moyenne et 8 arbres en vieille futaie) a été mesurée au tachéomètre. Les peuplements de recrûs et fourrés n'ont pas nécessité de mesures particulières sachant qu'ils se composent essentiellement de végétation basse en-dessous de 5 [m]. En complément à la mesure de hauteur, l'essence, le diamètre à hauteur de poitrine ainsi que le diamètre de la couronne ont été relevés. Les peuplements visités sont homogènes et bien représentatifs du type auquel ils appartiennent.

De manière similaire à la campagne de terrain réalisée sur le site de La Fruitière de Bevaix (annexe A), les hauteurs d'arbres ont été mesurées avec un tachéomètre Leica TPS 700 Performance Series (station totale). Les mesures ont été réalisées à partir d'un point fixe permettant de visualiser dans la totalité un échantillon représentatif de plusieurs arbres. La position absolue des tiges n'a pas été calculée. La localisation précise des arbres a cependant pu être déduite sur la base du MNH ombré et de plusieurs schémas de situation réalisés sur un fond de plan lors de la mesure. Au vu de la densité des couverts, il était en effet très difficile d'obtenir une couverture satellitale suffisante pour espérer déterminer une position de la station de mesure précise au GPS. Seules les mesures d'angles et de distances ont été réalisées en relatif selon le schéma illustré à la figure B.1.

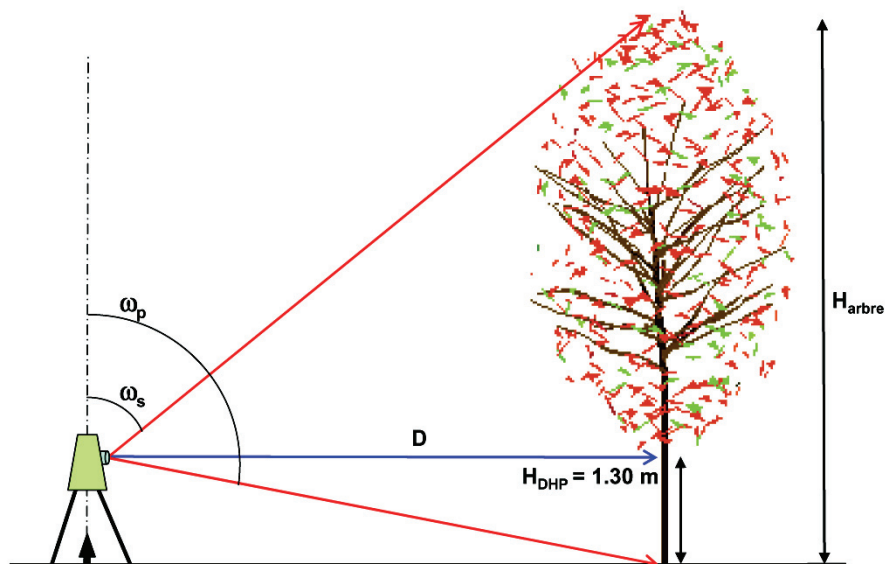


Figure B.1. Schéma des mesures prises avec le tachéomètre.

Le diamètre des troncs a été mesuré à hauteur de poitrine à l'aide d'un compas de forestier. Le diamètre de couronne est une moyenne entre deux mesures effectuées perpendiculairement (une mesure parallèle à la pente et l'autre perpendiculaire à la pente). Les espèces ont été correctement identifiées avec l'aide du forestier.

Annexes

Les tableaux B.1 à B.4 résument les données collectées pour les diamètres à hauteur de poitrine et les hauteurs d'arbres en peuplement....

Peuplement: Perchis			
	Essence	DHP [cm]	Hauteur [m]
1	Sapin	31	18.71
2	Cerisier	17	12.01
3	Mélèze	20	10.42
4	Mélèze	16	9.21
5	Mélèze	21	10.26
6	Douglas	29	15.87
7	Bouleau	18	14.69
8	Mélèze	16	10.76
9	Mélèze	18	9.33
10	Mélèze	14	9.88
11	Mélèze	19	11.72
12	Mélèze	13	9.70
		Moyenne: 19.3	Moyenne: 11.88

Tableau B.3 Résultats des mesures pour les perchis.

Peuplement: Jeune futaie			
	Essence	DHP [cm]	Hauteur [m]
13	Frêne	30	20.21
14	Sapin	28	18.46
15	Sapin	25	17.78
16	Epicéa	24	15.85
		Moyenne: 26.8	Moyenne: 18.08

Tableau B.4 Résultats des mesures pour la jeune futaie.

Peuplement: Futaie moyenne			
	Essence	DHP [cm]	Hauteur [m]
17	Epicéa	41	24.18
18	Chêne	31	20.81
19	Hêtre	36	15.84
20	Epicéa	36	22.31
21	Hêtre	41	21.55
22	Epicéa	39	19.73
		Moyenne: 37.3	Moyenne: 20.74

Tableau B.5 Résultats des mesures pour la futaie moyenne.

Peuplement: Vieille futaie			
	Essence	DHP	Hauteur
23	Epicéa	80	38.64
24	Sapin	72	30.83
25	Sapin	63	29.19
26	Sapin	60	31.29
27	Sapin	61	31.24
28	Epicéa	70	36.74
29	Sapin	83	26.66
30	Hêtre	59	29.79
		Moyenne: 68.5	Moyenne: 31.8

Tableau B.6 Résultats des mesures pour la vieille futaie.

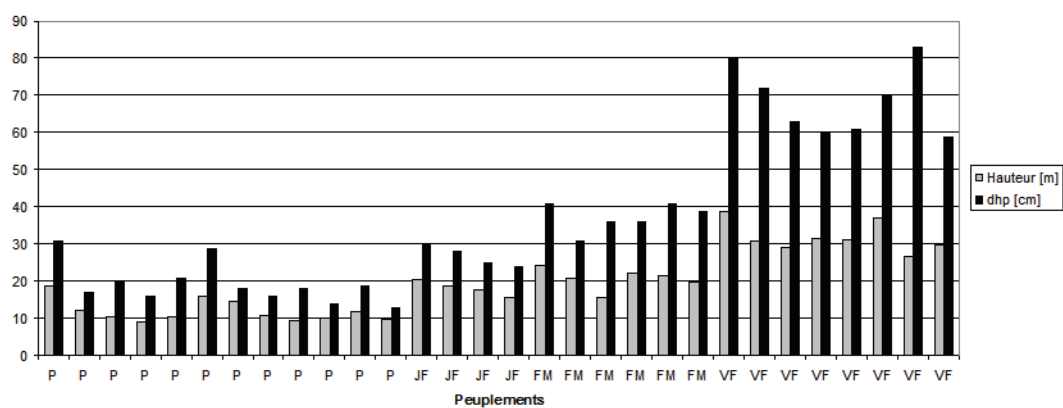


Figure B.2. Représentation graphique des diamètres à hauteur de poitrine et des hauteurs pour les 30 arbres mesurés lors de la campagne de terrain (P = perchis, JF = jeune futaie, FM = futaie moyenne, VF = vieille futaie).

Annexe C. Analyse de sensibilité pour les paramètres de segmentation dans le logiciel

Definiens 5: délimitation des hauteurs homogènes de peuplement

Le facteur d'échelle, qui influe sur la taille des segments produits, a été traité dans un premier temps. Une analyse de sensibilité a montré que la valeur de 40 était optimale pour le secteur d'étude (forêt mixte - résolution spatiale du MNH de 1 [m]) (figure. C1).

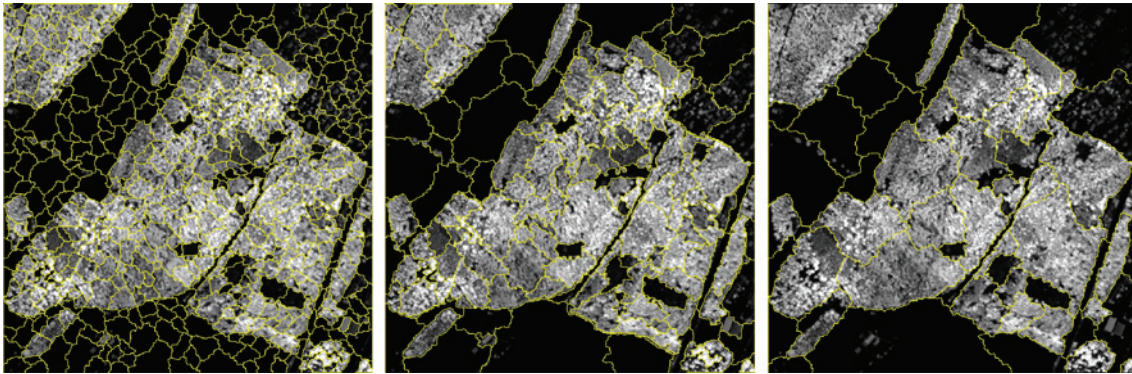


Figure C.1. Segmentation du MNH avec 3 différents facteurs d'échelle: 30 (à gauche), 40 (au centre), 70 (à droite).

L'analyse de sensibilité présentée ci-après porte sur les 2 paramètres de segmentation qui définissent le critère d'agrégation de la procédure de croissance de région, à savoir le ratio spectral/forme et le ratio compacité/sinuosité. Les 100 combinaisons des 2 paramètres de segmentation n'ont pas toutes été testées. Tout d'abord, la sensibilité du paramètre spectral/forme a été testée pour une valeur neutre du paramètre compacité/sinuosité, soit 0.5/0.5. La sensibilité du second paramètre a été évaluée par la suite, en fixant le premier à sa valeur optimale.

Ce choix de procédure se justifie dans le sens où le second paramètre n'est lié qu'au paramètre spatial: Il définit la manière dont la forme des objets est prise en compte.

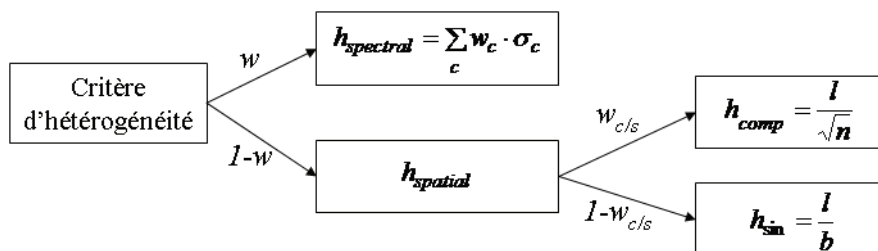


Figure C.2. Critère global d'hétérogénéité.

Annexes

Le tableau ci-dessous résume les résultats de cette analyse de sensibilité.

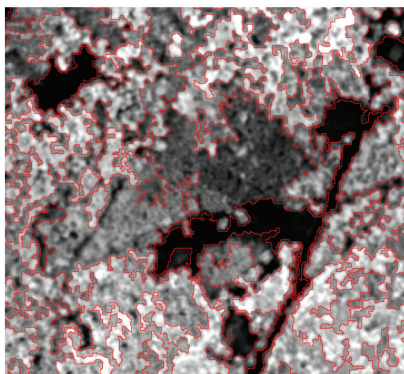
Echelle: 40			Compacité / Sinuosité										
			1	0.9	.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
Spectral Spatial	1.0	0.0											
	0.9	0.1											
	0.8	0.2											
	0.7	0.3											
	0.6	0.4											
	0.5	0.5											
	0.4	0.6											
	0.3	0.7											
	0.1	0.9											
	0.0	1.0											

Figure C.3. Analyse de sensibilité des paramètres: compacité/sinuosité; spectral/spatial

La gamme de paramètres applicables se situe entre 0.8/0.2 et 0.7/0.3 pour le paramètre spectral/forme, et entre 0.9/0.1 et 0.7/0.3 pour le paramètre compacité/sinuosité.

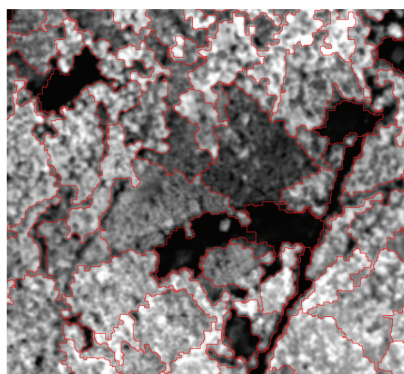
Le choix final de la combinaison la plus optimale s'est finalement porté sur les paramètres spectral / forme 0.7/0.3 et compacité / sinuosité 0.7/0.3. Les illustrations qui suivent illustrent cette démarche.

Sensibilité du paramètre spectral / spatial



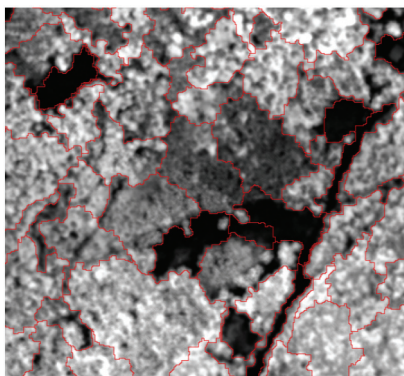
Facteur d'échelle: 40
Spectral / spatial: 1.0 / 0.0
Compacité / Sinuosité: 0.5 / 0.5

La croissance de région se base uniquement sur les caractéristiques spectrales de l'image. On obtient en conséquence des segments très homogènes du point de vue spectral, mais leur forme "tentaculaire" relativement complexe les rend inutilisables pour la délimitation de peuplements.



Facteur d'échelle: 40
Spectral / spatial: 0.8 / 0.2
Compacité / Sinuosité: 0.5 / 0.5

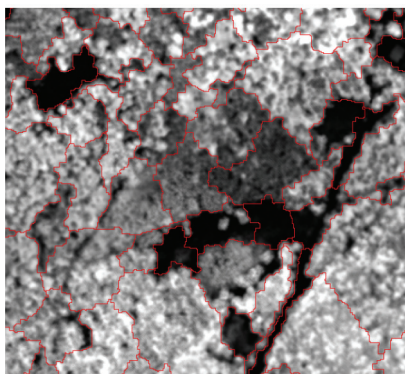
La croissance de région favorise le spectral, mais prend aussi en compte, dans une moindre mesure, l'homogénéité spatiale. Les segments restent relativement homogènes du point de vue spectral, mais sont nettement moins complexes. On remarque néanmoins la génération de segments le long des lisières difficiles à exploiter.



Facteur d'échelle: 40
Spectral / spatial: 0.7 / 0.3
Compacité / Sinuosité: 0.5 / 0.5

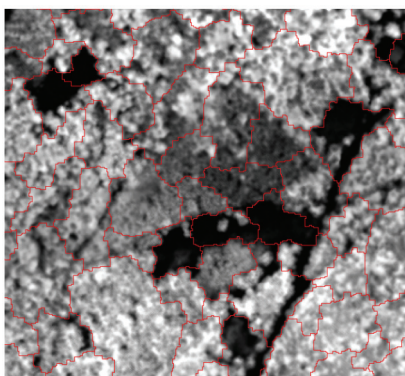
Par rapport au précédent, le spectral est légèrement moins pris en compte. Les segments sont en conséquence plus compacts, mais ils respectent moins bien l'homogénéité spectrale. Les segments de bordure sont un peu moins présents.

Figure C.4. Sensibilité du paramètre spectral / spatial.



Facteur d'échelle: 40
Spectral / spatial: 0.6 / 0.4
Compacité / Sinuosité: 0.5 / 0.5

Le spectral est de moins en moins pris en compte. En conséquence, les segments ont des formes de plus en plus compactes, mais au détriment de l'homogénéité spectrale. Les délimitations ne correspondent plus aux structures reconnaissables sur l'image.



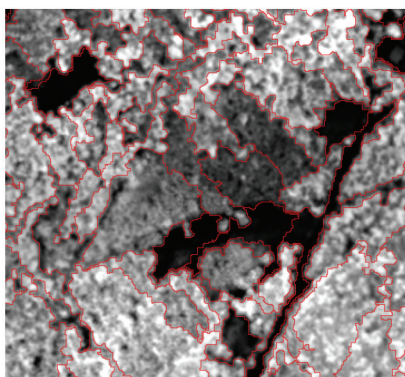
Facteur d'échelle: 40
Spectral / spatial: 0.3 / 0.7
Compacité / Sinuosité: 0.5 / 0.5

Lorsque la part du spectral dans le critère d'homogénéité décroît, les segments produits deviennent de plus en plus arbitraires et ne respectent plus le contenu informatif de l'image. Une telle segmentation n'est donc plus du tout valable.

Figure C.4. Sensibilité du paramètre spectral / spatial.

Au niveau du paramètre spectral/spatial, les valeurs optimales se situent donc entre 0.8/0.2 et 0.7/0.3. La première valeur donne les résultats les plus proches de la structure forestière mise en évidence par l'image, mais les segments produits ont encore des formes relativement complexes, donc difficiles à exploiter par la suite. La seconde est légèrement moins cohérente du point de vue spectral mais les segments produits sont généralement plus étendus et ont des formes nettement plus compactes qui correspondent mieux à la délimitation d'un peuplement.

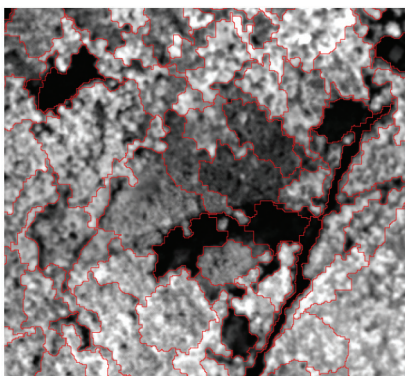
Sensibilité du paramètre compacité / sinuosité



Facteur d'échelle: 40
Spectral / spatial: 0.7 / 0.3
Compacité / Sinuosité: 0.0 / 1.0

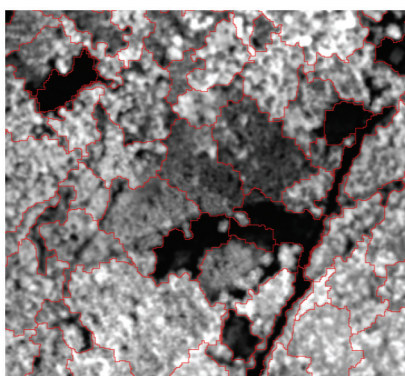
Le critère de forme, fixé à 0.3, est ici basé uniquement sur le paramètre de sinuosité. Les segments produits ont tendance à prendre des formes allongées et relativement complexes, mais suivent bien les structures forestières visibles. Cette forme allongée fait de plus réapparaître l'effet de lisière en bordure de forêt.

Figure C.5. Sensibilité du paramètre compacité/sinuosité.



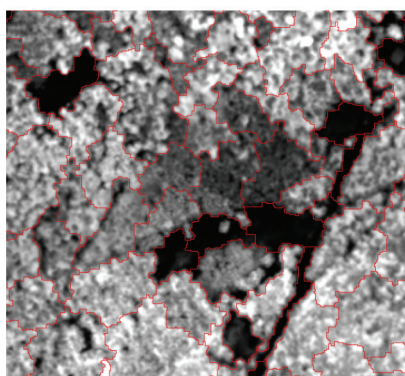
Facteur d'échelle: 40
Spectral / spatial: 0.7 / 0.3
Compacité / Sinuosité: 0.3 / 0.7

En réduisant le critère de sinuosité, on favorise une forme plus compacte des segments, qui prennent des formes moins complexes. Les effets de lisière sont aussi légèrement atténués.



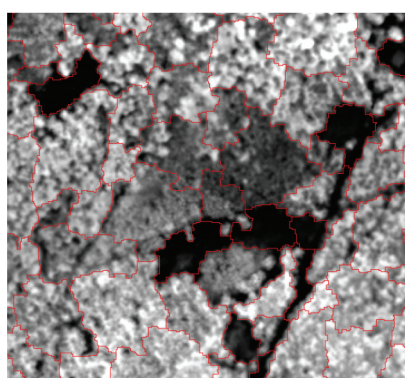
Facteur d'échelle: 40
Spectral / spatial: 0.7 / 0.3
Compacité / Sinuosité: 0.5 / 0.5

A l'équilibre entre les deux paramètres de compacité et de sinuosité, les segments obtenus ne suivent pas suffisamment fidèlement les structures forestières. On observe en revanche très peu d'effets de lisière, et les segments ont des formes facilement exploitables.



Facteur d'échelle: 40
Spectral / spatial: 0.7 / 0.3
Compacité / Sinuosité: 0.7 / 0.3

En favorisant le paramètre de compacité, on obtient des segments de forme simples, et on supprime l'effet de lisière. Par rapport au cas précédant, les segments produits semblent suivre les structures forestières avec une bien meilleure cohérence.



Facteur d'échelle: 40
Spectral / spatial: 0.7 / 0.3
Compacité / Sinuosité: 1.0 / 0.0

Dans ce dernier cas, le critère de forme est uniquement fonction du paramètre de compacité. Les segments produits sont en conséquence les plus compacts possibles, et tendent vers des formes proches du cercle. Favoriser le caractère compact amène donc à des segments de forme très simple, mais cette simplification se fait au détriment de la cohérence spectrale.

Figure C.5. Sensibilité du paramètre compacité/sinuosité.

Le choix d'un optimal pour le paramètre compacité/sinuosité est plus difficile que pour le paramètre spectral/spatial:

Les résultats ci-dessus montrent que considérer uniquement un des deux critères de forme n'est pas une bonne solution, pas plus que l'équilibre entre les deux paramètres. Les deux situations intermédiaires, favorisant un des deux paramètres ont chacune leurs avantages:

- En favorisant la sinuosité, on produit une segmentation très cohérente du point de vue spectral et au plus proche des structures bien marquées, mais les segments ont des formes trop complexes, ce qui induit une segmentation excessive de certaines zones homogènes. On a de plus un effet de lisière qui peut être problématique ultérieurement.
- En favorisant la compacité, on produit une segmentation légèrement moins cohérente du point de vue spectral, mais qui suit tout de même bien les structures forestières. Les segments ont des formes relativement simples, et ce autant sur les structures bien délimitées que sur les grands groupements, notamment les vieilles futaies. L'effet de lisière est totalement supprimé, mais les éléments linéaires tels que le chemin forestier est tout de même bien délimité.

Globalement, la meilleure solution semble être de favoriser la compacité. Les segments produits sont nettement plus exploitables et la qualité de l'identification des structures forestières n'est que très peu diminuée. Le paramètre optimal de compacité/sinuosité se situe donc dans une fourchette entre 0.9/0.1 et 0.7/0.3.

Choix de la combinaison optimale de paramètres

En croisant les deux plages optimales des deux paramètres, on obtient six combinaisons potentielles. Ces six combinaisons ont ensuite été comparées afin de mettre en évidence la plus adaptée. Il en ressort les paramètres suivants:

Spectral / spatial: 0.7/0.3

Compacité / sinuosité: 0.7/0.3.

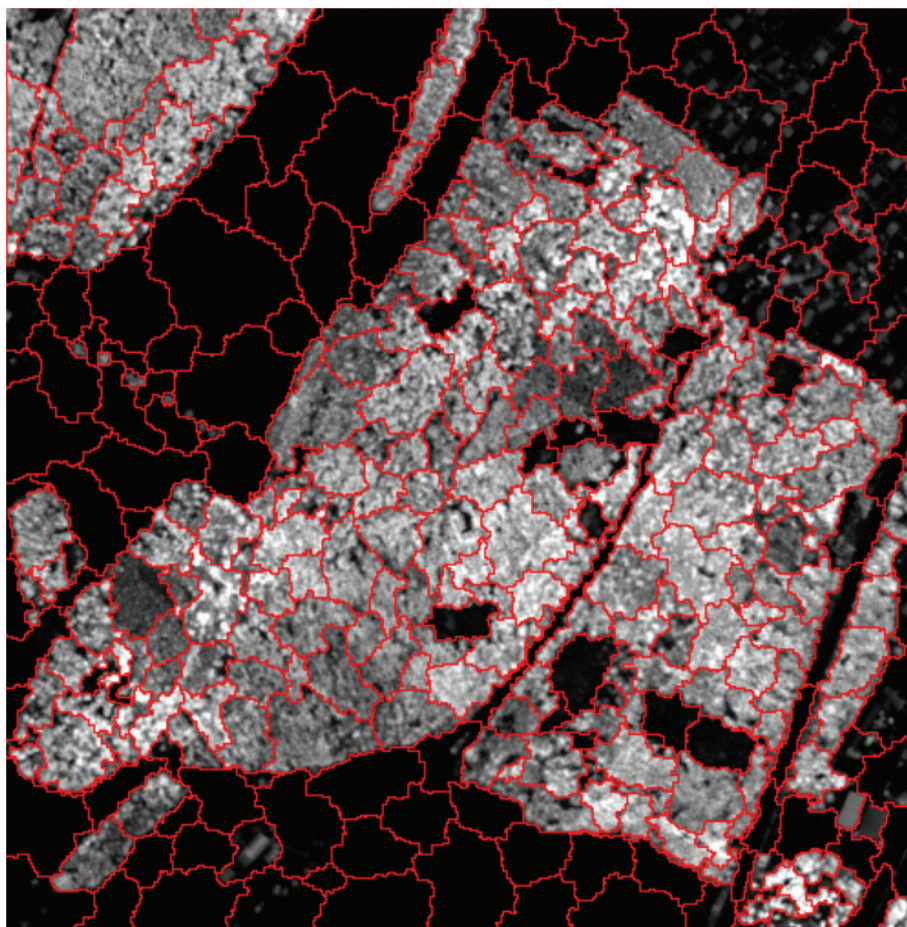


Figure C.6. Le résultat de la segmentation sur l'ensemble de la forêt de Charcotet. Paramètres utilisés: facteur d'échelle: 40, spectral / spatial: 0.8/0.2, compacité / sinuosité: 0.7/0.3

Annexe D. Développement d'une application (ASPL)

En milieu forestier, c'est en traitant directement le nuage de points bruts que l'on va pouvoir extraire le maximum d'information sur la structure d'un peuplement. La distribution des échos en végétation est un bon indicateur de l'architecture de la canopée en informant notamment sur la densité des tiges et du feuillage ou encore la présence d'un sous-bois luxuriant ou non. Etant donné qu'il n'existe pas encore de solutions commerciales ou d'outils SIG spécifiquement dédiés à l'extraction de variables forestières sur la base du nuage de points bruts LiDAR, une application informatique, nommée ASPL pour «Analyse Statistique des Points bruts LiDAR», a été développée. Sa mise en place et l'extension de ses fonctionnalités se sont fait en parallèle aux développements méthodologiques. L'objectif premier d'ASPL consiste à automatiser un certain nombre de fonctions, simplifier le traitement des données et ainsi augmenter le potentiel d'investigation. Ce chapitre a pour objectif d'exposer l'architecture de l'application, les fonctions déjà implémentées et son potentiel d'évolution.

Architecture et interface de l'application

La principale fonctionnalité de l'application ASPL repose sur l'automatisation de requêtes SQL imbriquées qui permettent de découper, sur la base d'un découpage vecteur prédéfini, le nuage de points bruts LiDAR. Une information statistique est ensuite dérivée pour chacun des sous-ensemble. La couche vecteur peut être un maillage régulier de cellules ou un découpage aléatoire propre à une thématique déterminée comme par exemple des unités administratives, d'aménagement ou de végétation.

Cette application a été entièrement développée en VBScript dans l'environnement de travail du logiciel SIG Manifold 7.x. Plusieurs raisons ont justifié ce choix :

- Manifold offre des facilités pour développer de nouvelles fonctionnalités grâce à un environnement simple et convivial.
- La librairie objet de Manifold est entièrement accessible et bien documentée.
- Même si Manifold permet de développer dans toute la gamme des langages.NET, un débogueur spécifique au langage VBScript est intégré dans le logiciel. En raison de l'expérience encore mince de l'auteur en programmation, le choix s'est donc porté sur un langage simple au détriment d'un langage plus performant mais plus complexe à implémenter.

L'architecture générale de l'application est illustrée par la figure suivante :

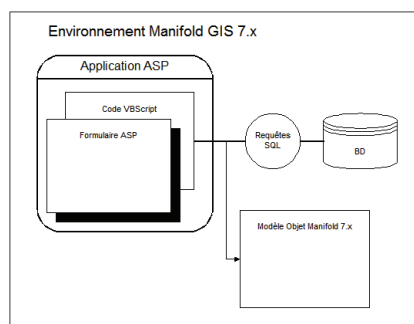


Figure D.1. Architecture de l'application ASPL.

L'interface de l'application se compose de 5 parties distinctes :

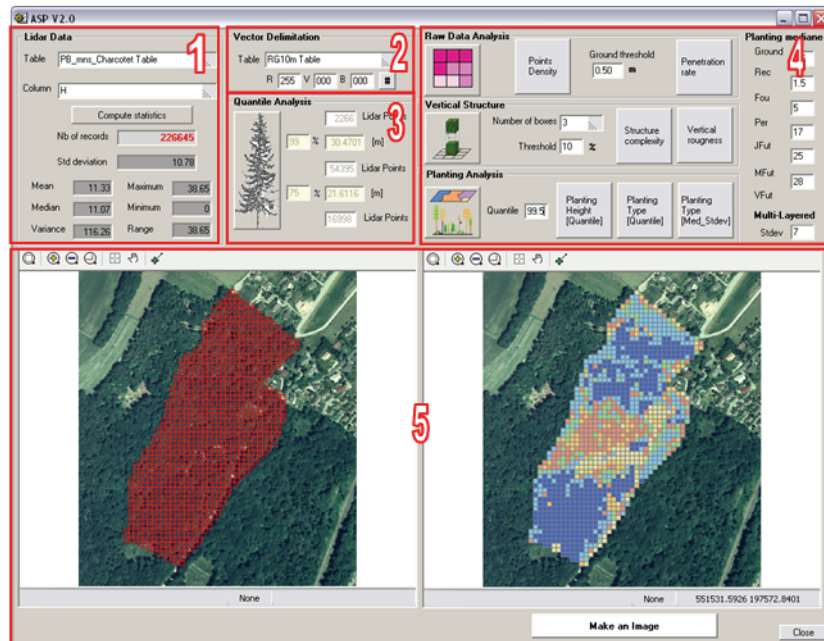


Figure D.2. Architecture de l'application ASPL.

1. **La sélection des données sources LiDAR.** Il est possible de définir manuellement l'attribut sur lequel on souhaite calculer des statistiques (altitude, hauteur, intensité,...).
2. **La sélection de la couche vecteur.** Etant donné qu'elle s'affiche sur un fond de plan, une option permettant de modifier librement les composantes de couleur Rouge-Vert-Bleu (RVB) des contours de polygones est implémentée dans le but d'optimiser la lisibilité de l'information.
3. **L'analyse statistique générale des données.** Afin de s'assurer de la cohérence des données (absence d'outliers), différentes statistiques générales relatives à l'attribut sélectionné sont calculées: nombre de points bruts, écart-type, moyenne, médiane, variance, maximum, minimum et l'étendue (*range*). En complément, et dans la mesure où l'attribut sélectionné est la hauteur des points bruts LiDAR par rapport au terrain (ce qui représente la grande majorité des cas), il est possible de calculer pour le fichier sélectionné au point 1, la hauteur correspondante pour un percentile donné. Cette information est notamment utile pour paramétrer la cartographie des structures et des hauteurs de peuplement.

4. **Le calcul des indicateurs forestiers.** Pour l'instant, ASPL propose la cartographie de 7 indicateurs séparés en trois thématiques:

Analyse de la distribution des données brutes:

- Carte de la densité des points bruts
- Carte du taux de pénétration des impulsions LiDAR jusqu'au sol

Analyse de la structure verticale du couvert:

- Carte de distribution des points bruts selon un découpage vertical discret
- Carte de l'écart-type de la distribution verticale des points bruts

Analyse des peuplements

- Carte des hauteurs de peuplement:
- Carte des types de peuplements I (basée sur une analyse des percentiles)
- Carte des types de peuplements II (basée sur une analyse de la médiane et de l'écart-type)

5. **L'affichage des résultats.** Afin de pouvoir évaluer de manière optimale les cartographies d'indicateurs, deux fenêtres côte à côte permettent d'afficher simultanément le découpage vecteur (à gauche) sur un fond de plan (orthophoto ou carte pixel) et le résultat cartographique (à droite). Les deux fenêtres sont des «mapobjects» de l'environnement Manifold. Elles sont ainsi dotées d'outils de navigation: zoom, pan et mesure de distance. La carte de gauche qui affiche la couche vecteur source est la «mapcontrol1» et la carte de droite qui affiche l'indicateur se nomme «mapcontrol2». La fonction «Make An Image» permet d'exporter une image (avec le fichier de géoréférence) du résultat affiché. Concrètement, chaque calcul d'indicateur passe par la création d'un nouveau composant vecteur, nommé «Indices». Celui-ci n'est rien d'autre qu'une copie de la table vecteur source pour le découpage du nuage de points bruts (même géométrie, même identifiant et même projection). On est alors libre d'y ajouter le nombre d'attributs nécessaires pour le calcul de l'indicateur. Le résultat est ensuite directement affiché dans le «mapcontrol2». La sémiologie graphique est assurée par des fichiers XML propres à chaque thématique.

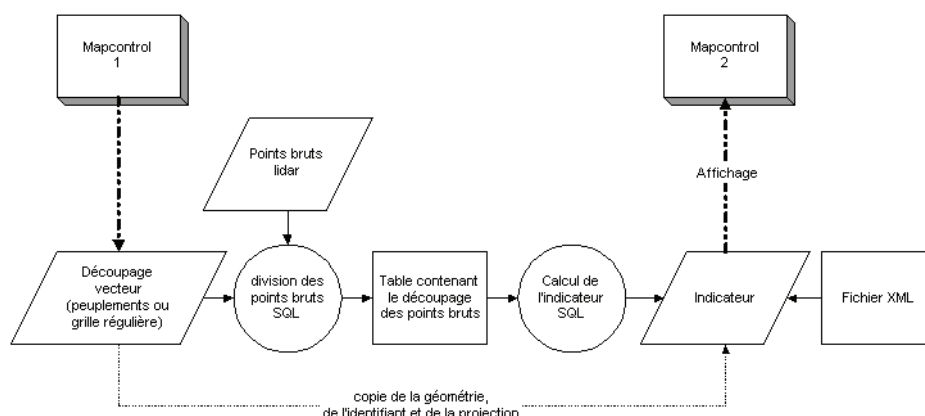


Figure D.3. Découpage des données LiDAR (structure de la requête SQL).

Structure des requêtes

Le principe de base de l'application consiste à attribuer à chaque point brut l'identifiant du polygone à l'intérieur duquel il se trouve. Les statistiques sont ensuite calculées sur la base de ce nouveau découpage. On est ainsi à même de générer une nouvelle information, plus locale, qui exploite pleinement la 3ème dimension inhérente au nuage de points bruts LiDAR. Les calculs se font à la volée et sans modifier les données sources. La requête spatiale repose sur l'opérateur «contains»:

```
SELECT [Table_LiDAR].[ID] as ID, [Table_LiDAR].[X] as X, [Table_LiDAR].[Y] as Y, [Table_LiDAR].[H] as H,
[Table_vecteur].[Col_Row] as Col_Row
FROM [Table_LiDAR], [Table_vecteur]
WHERE Contains ([Table_LiDAR].[ID], [Table_vecteur].[ID]);
```

Une légende, spécifique à chaque thématique traitée, est associée à chaque résultat via un fichier XML. Cette légende permet ainsi de mettre rapidement en évidence certaines caractéristiques. Chaque calcul génère une nouvelle couche temporaire qu'il est possible de sauver le cas échéant.

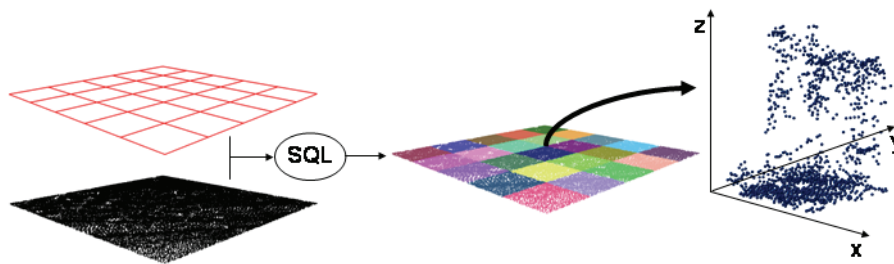


Figure D.4. Découpage des données LiDAR (structure de la requête SQL).

L'utilisation d'une **grille régulière** permet de dériver une information objective qui pourra révéler, en fonction de la taille de la maille, une information très locale ou au contraire plus régionale. Durant cette recherche, et en adéquation avec la problématique forestière, 3 différentes tailles de maille ont été utilisées: 5*5 [m²]; 10*10 [m²] et 20*20 [m²]. Il est à noter que le choix de la taille de la maille va dépendre de la densité des mesures LiDAR. Un nombre de points bruts suffisant (de l'ordre de 600 points (Riano et al., 2003)) est en effet requis pour que le résultat du calcul statistique soit significatif.

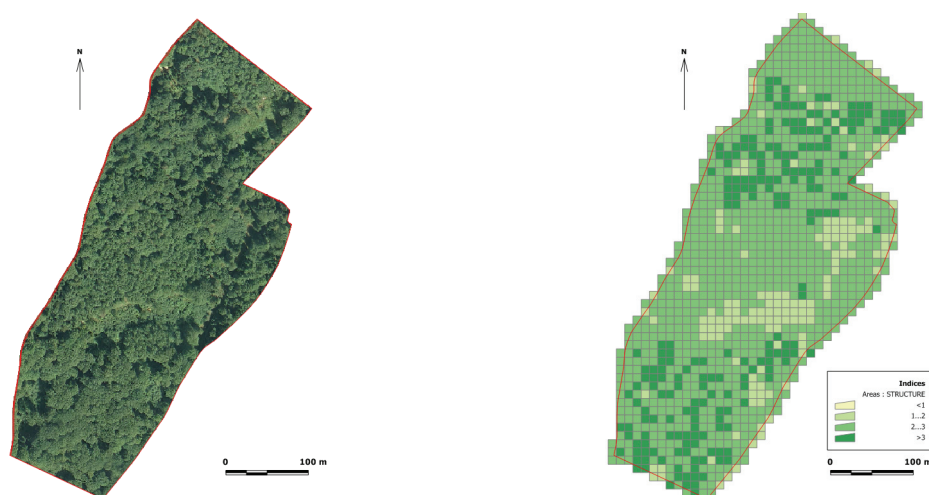


Figure D.5. Analyse de la structure verticale d'une division forestière sur la base d'une grille régulière de 20×20 [m²] (forêt de Charcotet, NE). La distribution verticale des points bruts à l'intérieur des cellules est divisée en 5 parties égales. Les structures «complexes», qui ont une distribution de points bruts assez uniforme sur toute la hauteur, sont représentées en vert foncé. Les structures «simples», avec une distribution moins homogène des points bruts, sont représentées en vert clair.

Au lieu d'utiliser une grille régulière, il est possible de générer une statistique sur la base d'un découpage irrégulier comme une limite administrative ou la délimitation d'unités végétales connues. De cette manière, le calcul est déjà plus orienté vers une thématique choisie et l'information dérivée devient plus spécifique.

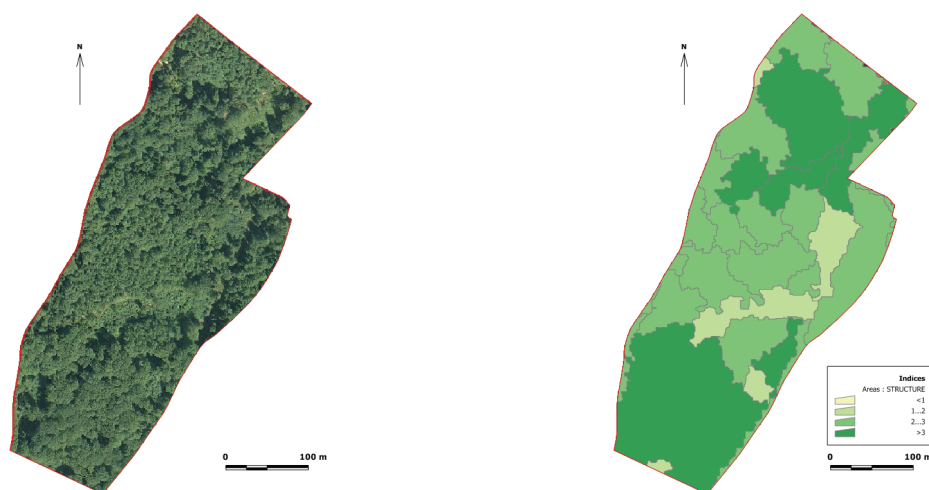


Figure D.6. Analyse de la structure verticale d'une division forestière sur la base d'une délimitation des peuplements (forêt de Charcotet, NE). La distribution verticale des points bruts à l'intérieur des polygones est divisée en 5 parties égales. Les structures «complexes», qui ont une distribution de points bruts assez uniforme sur toute la hauteur, sont représentées en vert foncé. Les structures «simples», avec une distribution moins homogène des points bruts, sont représentées en vert clair.

Préparation des données

Afin de pouvoir utiliser l'application de manière optimale, plusieurs manipulations doivent être effectuées pour la préparation du fichier de point brut, du fichier vecteur et de l'interface.

Le fichier de points bruts LiDAR

La création d'un MNT vecteur consiste à créer un attribut de hauteur pour chaque point brut LiDAR du MNS. Cette opération est effectuée en 2 temps:

- Ajouter l'attribut d'altitude du MNT à chaque point brut vecteur du MNS, grâce à une fonction de recouvrement (*Overlay*) entre le MNT raster et les données vecteur.
- Soustraire la valeur de l'altitude terrain à l'altitude LiDAR (attribut *z*) du MNS.

La précision de la valeur des hauteurs de points bruts et donc directement dépendante de la qualité du MNT.

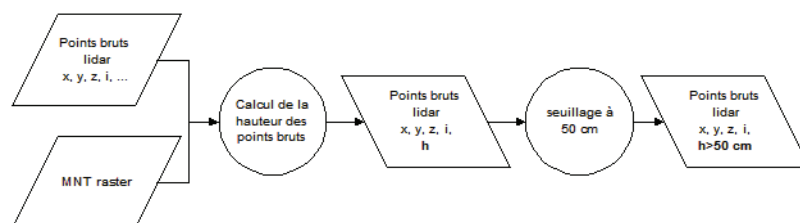


Figure D.7. Calcul de la hauteur des points bruts LiDAR.

Selon les objectifs, il est parfois préférable d'éliminer les points bruts de terrain et ne travailler qu'avec les mesures en végétation. Dans ce cas on élimine par seuillage les points bruts ayant une hauteur inférieure à 50 [cm]. Cette opération est notamment nécessaire pour améliorer l'analyse des structures verticales du couvert.

Le fichier vecteur de découpage

Le fichier vecteur de découpage doit avoir une colonne, nommée «Col_Row» et de type integer, qui va permettre d'attribuer à chaque polygone un numéro croissant de 0 à x. Cet attribut va servir à découper le nuage de points bruts LiDAR et incrémenter les «boucles» nécessaires pour les calculs statistiques.

L'interface Manifold

Dans le projet Manifold, il est essentiel que l'ensemble des couches soient dans le même système de projection. Afin d'agrémenter les «mapcontrols», il est nécessaire encore de créer deux nouveaux composants «maps». Le choix du fond de plan est à adapter en fonction de la thématique traitée.

Fonctions implémentées

Les fonctions implémentées dans ASPL permettent une analyse objective du couvert forestier sur la base du nuage de points bruts LiDAR. Elles sont groupées en 4 blocs distincts: l'analyse statistique générale des données, l'analyse de la distribution des points bruts, l'analyse de la structure verticale du couvert et l'analyse des peuplements. Les indicateurs sont paramétrés pour exploiter l'information de hauteur des

points bruts. Il est cependant possible de sélectionner un autre attribut, comme par exemple l'intensité du signal retour, pour calculer les statistiques générales. Afin d'illustrer le potentiel des différentes fonctions, un secteur test d'un hectare dans le 3ème arrondissement forestier du canton de Neuchâtel a été délimité. Ce secteur, très hétérogène au niveau de la couverture forestière, a également servi de première validation lors de l'élaboration de l'application ASPL. La surface d'un hectare n'étant pas représentative pour l'analyse des structures et des types de peuplements, la division 45 du 3ème arrondissement forestier du canton de Neuchâtel (Charcotet) a permis de compléter les résultats.

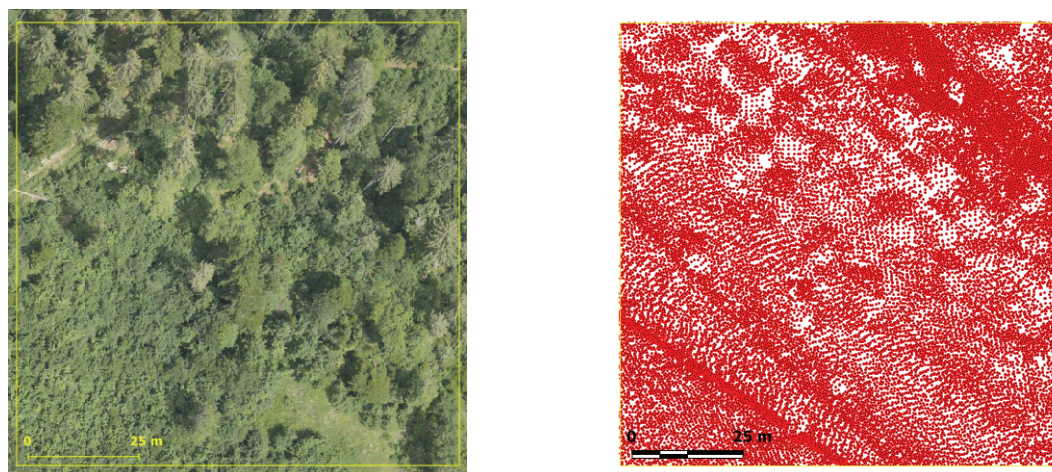


Figure D.8. Secteur choisi pour l'illustration des fonctions implémentées dans l'application ASPL.

Surface: 1 [ha]

Densité moyenne des points bruts: 3 à 4 [pts/m²]

Hormis le paragraphe dédié à l'analyse des statistiques générales, les différentes fonctions implémentées dans ASPL sont présentées en 4 points:

- Les objectifs de la fonction.
- La structure des requêtes: les éléments clés implémentés dans le code VBScript ont été extraits et mis en forme afin de présenter la logique de calcul.
- Un exemple de résultats, en proposant à chaque fois une comparaison entre l'orthophoto du secteur et la carte indicatrice calculée.
- Des remarques générales concernant l'utilisation de la fonction.

Statistiques générales

Le calcul de statistiques générales sur la base de l'attribut de hauteur du fichier de points bruts permet de se faire une première idée sur la qualité du jeu de données. Des informations sur la distribution verticale (écart-type, range, percentiles,...) et sur les valeurs extrêmes (minimum, maximum) permettent, le cas échéant, d'identifier s'il y a des valeurs erronées. Des hauteurs négatives ou au contraire trop élevées (par exemple supérieures à 100 m) peuvent signifier que des points bruts du MNS ont été mal calibrés ou encore que le MNT utilisé pour le calcul des hauteurs est localement altéré. Ce bloc d'information est encore très utile pour chercher les bons paramètres à évaluer dans le calcul des indicateurs implémentés dans les 3 autres blocs. Par exemple, la valeur seuil pour le calcul du taux de pénétration des impulsions laser en forêt pourra être ajustée en fonction des valeurs extrêmes de l'attribut de hauteur.

Cette application est principalement un outil exploratoire des données brutes LiDAR. Lorsque l'on dispose d'une référence terrain, on peut donc s'en servir pour analyser des échantillons de points bruts extraits à l'échelle d'un peuplement ou d'une placette d'analyse, afin de rechercher des caractéristiques

Annexes

discriminantes entre différents types de peuplements. La figure 6.9 illustre une comparaison entre les statistiques calculées pour deux échantillons de points bruts extraits pour deux peuplements distincts sur la base d'un inventaire réalisé par le forestier.

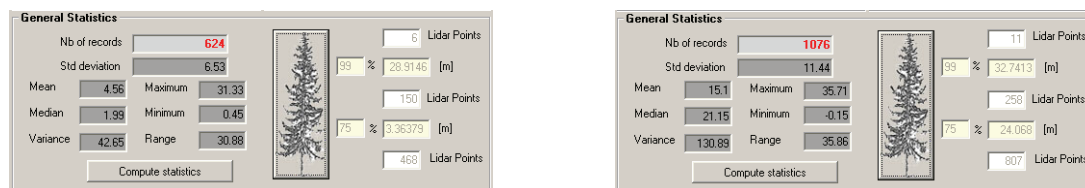


Figure D.9. Comparaison des statistiques de l'attribut de hauteur calculées pour deux échantillons: à gauche, les résultats de l'analyse de points bruts pour un peuplement de fourrés; à droite la même analyse pour une futaie étagée.

Les résultats ainsi présentés sont précieux pour choisir les paramètres optimaux pour l'étude des peuplements.

Analyse de la distribution des données

Ce bloc d'analyse permet de s'assurer de la bonne qualité des données en étudiant la densité des mesures ainsi que le coefficient de pénétration des impulsions laser à travers les interstices de la canopée.

Densité des mesures

Objectif

L'objectif de cette fonction est de générer une carte de densité des points bruts LiDAR, afin de s'assurer que la quantité et que l'homogénéité des mesures sont suffisantes pour le calcul des indicateurs. D'une manière générale, il est souhaitable d'utiliser une grille régulière pour ce type d'analyse. La taille de la maille est à adapter en fonction de l'échelle à laquelle les peuplements forestiers vont être étudiés ensuite.

Requête effectuée pour chaque polygone

```
Select [Table_vecteur].[Col_Row] as Col_Row, Count(*) as Tot_PB
From [Table_LiDAR], [RG20m]
Where Contains([Table_vecteur].[ID], [Table_LiDAR].[ID])
Group by [Table_vecteur].[Col_Row]
```

Résultats

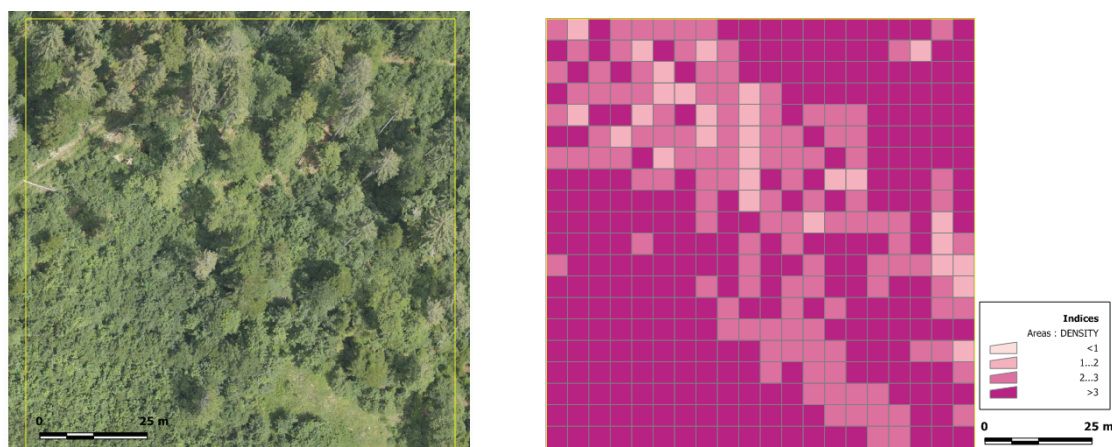


Figure D.10. Carte de la densité des points bruts LiDAR sur la base d'une grille régulière d'analyse de 5 [m] de résolution.

Remarques

Lorsque l'on analyse non pas les points bruts du MNS (ensemble des mesures) mais uniquement les points bruts terrain (MNT), la cartographie des densités des mesures au sol nous révèle alors une information sur la densité de la canopée. Une faible densité locale de mesures au sol peut en effet révéler une couverture très dense du couvert. Cette information peut ensuite être complétée par une analyse du coefficient de pénétration. Ajoutons que la cartographie de la densité des points bruts au sol est également un très bon indicateur pour estimer la précision du MNT qui sera interpolé sur la base de ces données. Il faudra en effet être relativement prudent avec les secteurs ayant une densité très faible (cas de Corbeyrier).

La fonction du calcul de densité est donc un outil à utiliser en amont de tout traitement réalisé sur la base des points bruts LiDAR. Il permet de créer rapidement des cartes indicatrices sur l'homogénéité et la qualité des données, et ainsi limiter le risque de mauvaises interprétations des résultats dérivés sur la base de ces données. La navigation à travers les points bruts est souvent délicate. La possibilité de disposer directement d'une information statistique, à plusieurs échelle, est une solution efficace pour mettre en évidence une situation marginale.

Taux de pénétration des impulsions LiDAR

Objectif

Les impulsions laser ont la propriété de pénétrer à travers les interstices du couvert forestier. La chance qu'une impulsion atteigne le sol dépend principalement de la densité de la canopée ainsi que de l'angle d'incidence des impulsions. Le taux de pénétration T_p s'exprime par le rapport entre nombre de points bruts ayant atteint le sol sur le nombre de points bruts totaux:

$$T_p = \frac{PB_{sol}}{PB_{tot}}$$

La connaissance du taux de pénétration à l'échelle d'une unité d'aménagement ou d'un peuplement informe donc sur les conditions durant l'acquisition (période de végétation propice ou non) et permet de localiser les densités de couvert limites qui risquent de poser problème pour identifier la structure verticale du couvert.

Avec l'appui de l'orthophoto en parallèle, cette information est encore très utile pour localiser les trouées qui sont caractérisées par un taux de pénétration très élevé.

Requête effectuée pour chaque polygone

Le calcul du taux de pénétration est réalisé en trois temps: Tout d'abord, le nombre total de point bruts par polygone est calculé par deux requêtes imbriquées à l'intérieur d'une boucle. La première requête ajoute aux points bruts l'identifiant du polygone vecteur à l'intérieur duquel il se trouve. La seconde requête sélectionne les points bruts dont on fera la somme pour chacun des polygones avec la fonction «count». On obtient ainsi le nombre total de points bruts par polygone.

Ensuite, le nombre de points bruts au sol est calculé de la même manière, mais avec une nouvelle contrainte sur la hauteur seuil. Les points bruts supérieurs à la valeur seuil sont ainsi ignorés. On obtient ainsi le nombre total de points bruts au-dessous du seuil pour chaque polygone.

Finalement, le taux de boisement est calculé par le rapport entre les deux valeur précédemment calculées pour chaque polygone:

For i = 1 to nombre_de_polygones -1

SELECT Identifiant, Hauteur

FROM (SELECT [Table_LiDAR].[ID] as Identifiant, [Table_LiDAR].[H] as H, [Table_vecteur].[Col_Row] as Col_Row

FROM [Table_LiDAR], [Table_vecteur] WHERE Contains ([Table_vecteur].[ID], [Table_LiDAR].[ID]))

WHERE [Col_Row] = i

...

SELECT Identifiant, Hauteur

FROM (SELECT [Table_LiDAR].[ID] as Identifiant, [Table_LiDAR].[H] as H, [Table_vecteur].[Col_Row] as Col_Row

FROM [Table_LiDAR], [Table_vecteur] WHERE Contains ([Table_vecteur].[ID], [Table_LiDAR].[ID]))

WHERE [Col_Row] = i AND H < seuil

...

taux_de_pénétration = nombre_de_points_bruts_au_sol / nombre_de_points_bruts_totaux

Next

'i = identifiant des polygones.

'seuil = valeur qui définit la hauteur marquant la séparation entre un point brut au sol ou en végétation.

Résultats

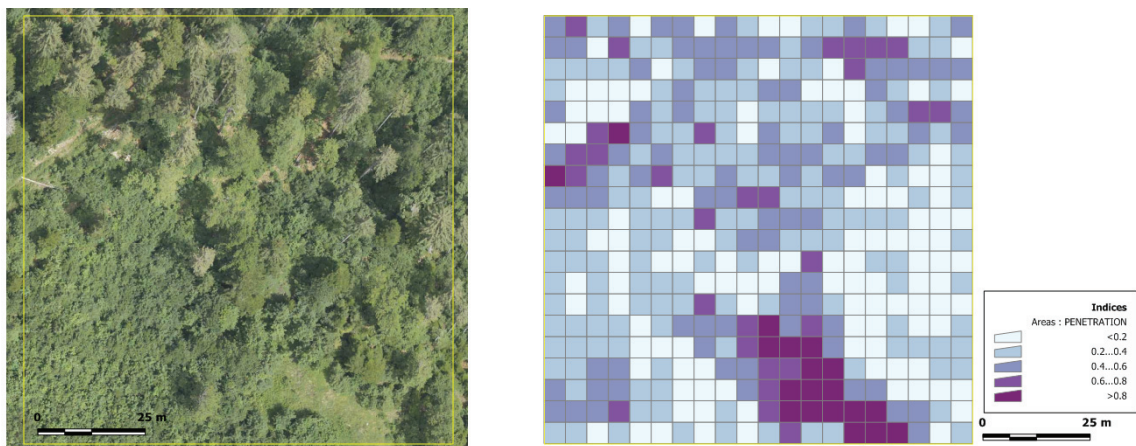


Figure D.11. Carte du taux de pénétration des impulsions LiDAR.

Remarques

L'analyse du taux de pénétration sur la base d'un découpage des peuplements forestiers informe sur la structure de la canopée. Ce renseignement s'avère utile pour le forestier puisqu'il informe, de manière indirecte, sur la quantité d'énergie lumineuse susceptible d'atteindre le sol. On pourra donc faire une première estimation de la richesse du sous bois.

Analyse de la structure verticale du couvert

La simple vue d'un profil en forêt à travers le nuage de points bruts illustre le potentiel de l'altimétrie LiDAR à révéler une information sur la structure verticale du couvert.

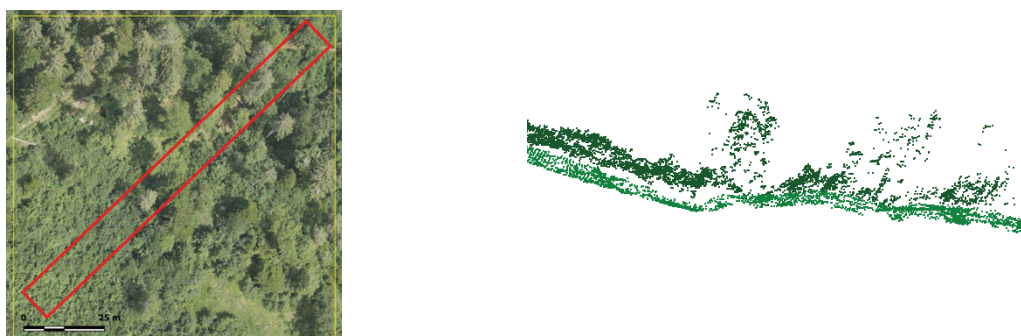


Figure D.12. Transect à travers le nuage de points bruts sur le secteur test d'un hectare (longueur: 200 [m]; largeur: 10 [m]).

Afin d'extraire une information normalisée et objective de la structure verticale du couvert, deux fonctions ont été implantées dans ASPL. La première consiste à découper en tranches verticales le nuage de points pour ensuite identifier les niveaux significativement remplis par des points de mesures. La seconde consiste simplement à identifier des classes de structures en calculant l'écart-type de la distribution des points de mesures à l'intérieur de chaque polygone.

Distribution des points bruts selon un découpage vertical discret

Objectif

Cette fonction a pour but de permettre la distinction entre les structures étagées et les structures moins complexes. Cette information est notamment importante pour caractériser les différents types de futaies. Même si la majorité des échos LiDAR se font à la surface de la canopée, les réflexions à l'intérieur du couvert peuvent se révéler suffisantes pour déduire des renseignements significatifs sur la structure en place. Pour que cette information soit correctement interprétée, il est important de s'assurer au préalable que la densité moyenne des données sources est suffisante et surtout d'estimer le taux de pénétration afin de localiser certaines inégalités qui peuvent être liées au mélange forestier.

Le découpage du nuage de points bruts en différentes strates de hauteur permet de discrétiser la distribution verticale des mesures. Le nombre de séparation est ajustable par l'opérateur. La densité des échos pour chacune des strates est ensuite calculée. En appliquant une valeur seuil (modifiable par l'opérateur), il est alors possible d'identifier les tranches de hauteur significativement remplies par des échos. En faisant la somme du nombre de tranches considérées comme pleines, on génère un indicateur de structure.

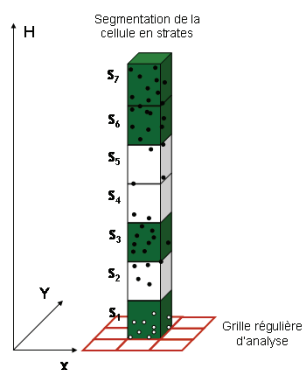


Figure D.13. Indice de structure verticale sur la base d'une grille régulière d'analyse. Les strates colorées ont une densité d'échos LiDAR supérieure au seuil fixé par l'opérateur (généralement entre 10 et 15%). La valeur de l'indicateur qui sera cartographié est la somme des strates considérées comme pleines.

Requête effectuée pour chaque polygone

L'analyse de la densité des échos pour un nombre de strates choisi par l'opérateur repose sur une imbrication de 4 requêtes plus ou moins complexes. Il faut en premier lieu attribuer l'identifiant du polygone aux points bruts contenus dans celui-ci. La connaissance de la hauteur maximale de la forêt ($H_{forêt}$), calculée sur la base du point brut le plus haut du fichier LiDAR, et du nombre de strates pour l'analyse ($nombre_de_strates$) permet de découper le nuage de points bruts en tranches de hauteur. La somme des points bruts par strates de hauteur est ensuite calculée. Finalement la fonction SQL «TRANSFORM» permet de générer un tableau qui affiche le nombre total de points bruts présent à l'intérieur de chacune des strates et cela pour chaque polygone.

```
TRANSFORM Avg(hit)
SELECT Col_Row
FROM (
  SELECT Col_Row, strate, Count(*) as hit
  FROM (
    SELECT IDENT, Col_Row, H, Ceil((H)/((H_foret)/nombre_de_strates)) as strate
    FROM (
      SELECT [Table_LiDAR].[ID] as IDENT, [Table_LiDAR].[X] as X, [Table_LiDAR].[Y] as Y, [Table_LiDAR].[H] as H, [Table_vecteur].[Col_Row] as Col_Row
      FROM [Table_LiDAR], [Table_vecteur]
      WHERE Contains ([Table_vecteur].[ID], [Table_LiDAR].[ID]))
    GROUP BY Col_Row, strate
    GROUP BY Col_Row
    PIVOT strate
```

cellule\strate	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆
0	187					
1	34		6	38	18	2
2		10	128	137	153	
...

Tableau D.1 Extrait d'un tableau résultant de la requête SQL paramétrée pour 6 strates.

L'analyse de ce tableau permet finalement d'attribuer une valeur de structure (*presence*) qui correspond au nombre de strates vides composant le découpage vertical des polygones. Cet indicateur est calcul grâce à deux boucles imbriquées. La première permet l'analyse systématique de chacun des polygones (indice i), la seconde permet de passer en revue chacune des strates (indice b):

```

For i = 0 to nombre_de_polygones

  For b = 1 to nombre_de_strates -1
    densité_de_PB = PB_strate(b)/PB_tot
    If densité_de_PB < ((seuil)/100) then
      irecordset.item(i).data("B"&b) = 0
    End if
    If densité_de_PB > ((seuil)/100) then
      irecordset.item(i).data("B"&b) = 1
    End if
  Next

  '// calcule de l'indice de structure sur la base du nombre de boîtes vides par cellule
  presence = 0
  For b = 1 to nombre_de_strates
    presence = presence + irecordset.item(i).dataText("B"&b)
  Next
  irecordset.item(i).data("STRUCTURE") = presence
Next

```

Résultats

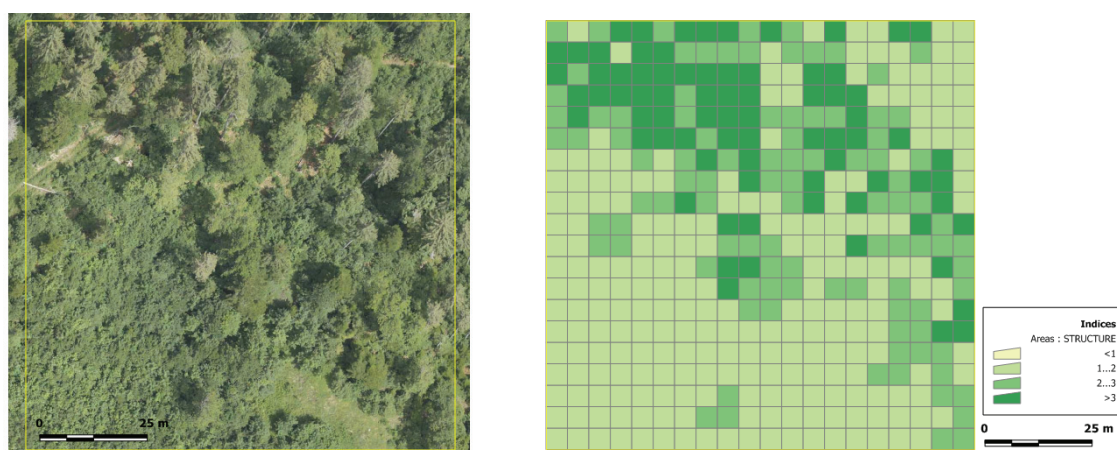


Figure D.14. Analyse des structures verticales.

Concrètement, il est conseillé d'évaluer plusieurs valeurs de seuils de détection (de 5% à 20% par exemple) afin d'identifier l'étagement de manière plus dynamique. Si la fonction est plus spécifiquement construite pour travailler avec une délimitation prédéfinie des peuplements, l'analyse par grille régulière (avec plusieurs résolutions possible) est utile pour valider de manière objective les résultats.

Remarques

Pour l'instant, toutes les strates ont une hauteur identique. La hauteur maximale (définie par le range) est divisée en parts égales selon le nombre de tranches définies. Une option à envisager comme perspective serait la possibilité de déplacer comme on le désire les hauteurs de strates afin de pouvoir délimiter plus précisément les différents étages du couvert. La réalisation de cartes de structures en 2.5D à l'échelle d'une unité d'aménagement apporte une aide visuelle intéressante pour mettre rapidement en évidence les structures étagées ou les trouées. Le choix d'une sémiologie adaptée et la superposition d'informations complémentaires peut en améliorer encore le rendu.



Figure D.15. A gauche: vue en 2.5D d'une carte des structures de peuplements affichée avec l'extension 3DAnalyst de ArcGIS. Cette cartographie a été réalisée pour un découpage en 6 strates de hauteur et un seuil de densité de 10%. A droite: une vue de l'ombrage du MNH.

Ecart-type de la distribution verticale des points bruts

Objectif

L'écart-type est un bon indicateur qui informe sur la distribution verticales plus ou moins homogène des points bruts à travers le couvert. De la même manière que l'analyse basée sur le découpage vertical en strates de hauteur, l'analyse de l'écart-type permet de délimiter certaines structures forestières caractéristiques: futaies étagées, trouées, plantations. Cette information simple apporte donc des renseignements objectifs pour aider ou valider la discrimination entre différents types de peuplements. Il est néanmoins conseillé de traiter ce résultats en parallèle avec le taux de pénétration pour s'assurer de la bonne homogénéité spatiale des données sources.

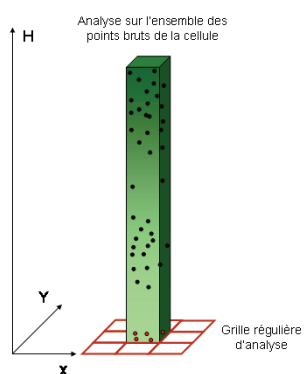


Figure D.16. Analyse de l'écart-type de la distribution verticale des points bruts sur la base d'une grille régulière d'analyse.

Requête effectuée pour chaque polygone

L'implémentation du calcul de l'écart-type de la distribution verticale des points bruts à l'intérieur de chacune des délimitations vecteur a été réalisée en 2 étapes. Une première requête ajoute à chaque point brut l'attribut du polygone à l'intérieur duquel il se trouve. Le résultat est une table nommée «Requête_1» pour l'exemple. Une seconde requête permet de calculer l'écart-type de la distribution verticale des points bruts (H_stdev) à l'intérieure de chaque polygone.

//Requête: 1

```
SELECT [Table_LiDAR].[ID] as ID, [Table_LiDAR].[H] as H, [Table_vecteur].[Col_Row] as Col_Row
FROM [Table_LiDAR], [Table_vecteur]
WHERE Contains ([Table_vecteur].[ID], [Table_LiDAR].[ID])
```

//Requête: 2

```
For i = 0 to nombre_de_polygones -1
SELECT *
FROM [Requête_1]
WHERE [Requête_1].[Col_Row]="&i&"
If Hrecordset > 1 Then
    H_stdev = Hrecordset.StandardDeviation("H")
Else
    Application.MessageBox("Hrecordset.count < 1")
End If
irecordset.item(i).data("STDEV")=H_stdev
Next
```

i = identifiant des polygones.

Résultats

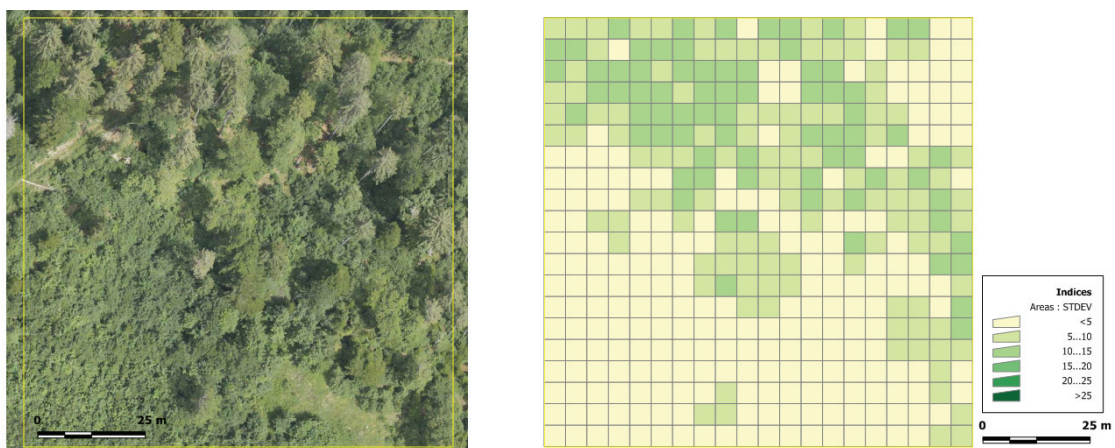


Figure D.17. Analyse de l'écart-type.

Remarques

La cartographie de l'écart-type est fortement corrélée avec l'analyse basée sur le découpage vertical en strates de hauteur. Cette dernière est néanmoins mieux adaptée à l'identification des différentes strates, notamment grâce à la table associée.

Analyse des peuplements

Hauteurs de peuplement

Objectif

Le nuage de points bruts nous permet d'extraire rapidement et de manière robuste une information sur la hauteur des peuplements. C'est d'ailleurs une des grandes forces des modèles altimétriques LiDAR en comparaison aux images aériennes «classiques». Dans l'outil ASPL, l'automatisation du calcul de la hauteur des peuplements a été implémentée en se basant sur l'analyse des percentiles. Ces mesures ont l'avantage d'être moins sensibles aux distributions allongées et aux valeurs aberrantes. Il est possible de choisir la valeur du percentile sur la base duquel la cartographie de hauteur sera réalisée.

La première étape consiste à calculer la valeur de rang n :

$$n = \frac{N}{100} \cdot q + \frac{1}{2}$$

q exprime le $q^{\text{ème}}$ percentile et N le nombre total de points bruts ordonnés sur le critère de hauteur.

La valeur du rang est arrondie à l'entier le plus proche afin d'extraire la valeur de hauteur correspondante. Afin d'avoir une bonne estimation de la hauteur du couvert il est conseillé de choisir un percentile voisin de 99.

Requête effectuée pour chaque polygone

Une première requête ajoute à chaque point brut l'attribut du polygone à l'intérieur duquel il se trouve. Le résultat est une table nommée «Requête_1» pour l'exemple. Une seconde requête permet de calculer pour chaque polygone le rang (*rang*) et la valeur de hauteur associée (*Qxxvalue*) pour la valeur du percentile entrée en paramètre (*percentile_xx*).

//Requête: 1

```
SELECT [Table_LiDAR].[ID] as ID, [Table_LiDAR].[H] as H, [Table_vecteur].[Col_Row] as Col_Row
FROM [Table_LiDAR], [Table_vecteur]
WHERE Contains ([Table_vecteur].[ID], [Table_LiDAR].[ID])
```

//Requête: 2

```
For i = 0 to nombre_de_polygones -1
SELECT *
FROM [Requête_1]
WHERE [Requête_1].[Col_Row]="&i&"
rang = round(percentile_xx*((nombre_de_pb+1)/100)
Lngrang = CLng(rang)
set sortedHrecordset = Hrecordset.sort("H")
Qxxvalue = sortedHrecordset.Item(Lngrang).Data("H")
Next
```

Résultats

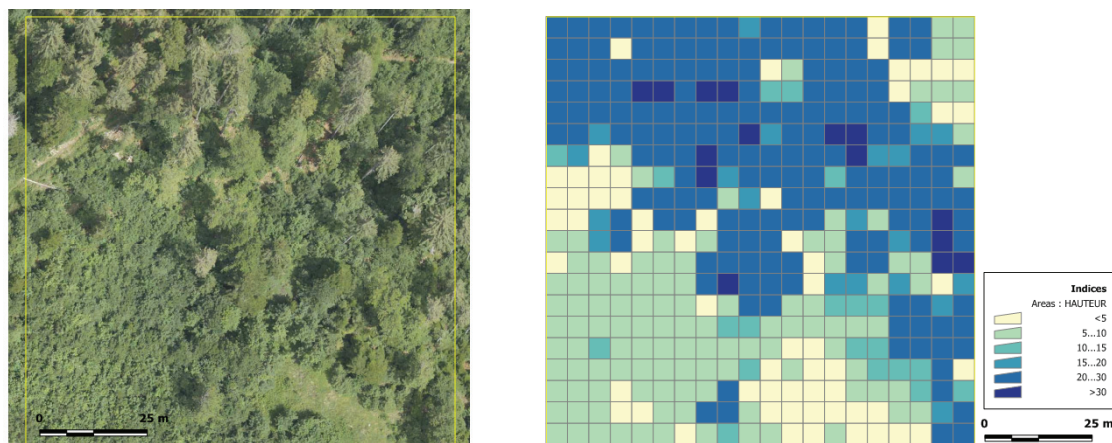


Figure D.18. Cartographie des hauteurs de peuplements.

Remarques

La cartographie des hauteurs de peuplements avec une approche par percentiles est relativement peu influencée par la présence de clairières ou d'ouvertures dans le peuplement. Néanmoins, pour éviter de sous-estimer systématiquement la hauteur du couvert, il est conseillé d'éliminer les points bruts au sol (par exemple avec un seuillage à 50 cm) avant le traitement.

Types de peuplement

Objectif

La fonction qui consiste à cartographier les types de peuplements est essentiellement un outil exploratoire. Deux approches parallèles sont proposées: la première repose sur une discrimination des peuplements par l'étude des percentiles, alors que la seconde considère la médiane et l'écart-type. Les peuplements forestiers se distinguent en grande partie par leur hauteur moyenne, leur structure horizontale (distribution des diamètres dominants à l'intérieur du peuplement) et verticale (présence de plusieurs étages de végétation). La légende des peuplements du canton de Neuchâtel comporte 9 classes décrites par le tableau D.1:

		Description
	1	prés, clairières / trouées en forêt
Jeune forêt	2	recrû libéré (= arbres jusqu'à 1.5 [m] de hauteur) / sous abri
	3	fourré (= arbres entre 1.5 et 5 [m] de hauteur)
	4	perchis (= arbres > 5 [m] de hauteur, jusqu'à 20 cm dhp ^a)
Futaies	5	jeune futaie (de 20 jusqu'à 35 cm dhp)
	6	futaie moyenne (de 35 jusqu'à 50 cm dhp)
	7	vieille futaie (plus de 50 cm dhp)
	8	peuplement étagés (sens large)
	9	forêt parcourue par le bétail

Tableau D.2 Légende des peuplements du canton de Neuchâtel

a. dhp = diamètre à hauteur de poitrine (hauteur sol = 1.30 [m])

Les peuplements 1 à 7 sont délimités sur la base d'une variable statistique (percentile ou médiane) pour

Annexes

laquelle des seuils sont définis. Les valeurs initiales de ces derniers ont été déterminés par une analyse d'échantillons sélectionnés sur la base d'une délimitation des peuplements faites par le forestier (annexe X). Dans une seconde étape, les peuplements étagés sont discriminés en prenant en compte la valeur de l'écart-type de la distribution verticale des points bruts. Au-delà d'une certaine valeur seuil (ajustable) les futaies sont classées comme étagées. Les forêts parcourues par le bétail ne présentent quant à elles pas de caractéristiques spatiales assez marquées pour être discernées à l'aide des modèles altimétriques LiDAR. Ce type de peuplement a donc été ignoré. Cette fonction n'a pas pour objectif de produire une carte définitive des peuplements, mais plutôt d'apporter une première analyse utile et objective de la structure forestière en place.

Requête effectuée pour chaque polygone

De manière identique aux précédentes fonctions, une première requête ajoute à chaque point brut l'attribut du polygone à l'intérieur duquel il se trouve. Le résultat est une table nommée «*Requête_1*» pour l'exemple. Une seconde requête calcule ensuite pour chaque polygone la médiane et l'écart-type (première approche) ou la hauteur correspondante au percentile sélectionné et l'écart-type (seconde approche). Le peuplement est finalement attribué à l'aide d'une boucle «if... else if...». L'interface permet d'ajuster la valeur du percentile (seconde approche) et modifier de manière interactive les seuils pour la médiane et l'écart-type.

//Requête: 1

```
SELECT [Table_LiDAR].[ID] as ID, [Table_LiDAR].[H] as H, [Table_vecteur].[Col_Row] as Col_Row
FROM [Table_LiDAR], [Table_vecteur]
WHERE Contains ([Table_vecteur].[ID], [Table_LiDAR].[ID])
```

//PREMIERE APPROCHE

//Requête: 2

```
For i = 0 to nombre_de_polygones -1
SELECT *
FROM [Requête_1]
WHERE [Requête_1].[Col_Row]="&i&"
```

Hmedian = Hrecordset.median("H").data("H")

If Hrecordset.count > 1 Then

Hstdev = Hrecordset.StandardDeviation("H") 'calcul de l'écart-type de la distribution des PB

End If

'Définition des seuils

seuil_med1 = Med_choice1.text

S_Med1 = CDb1(seuil_med1)

seuil_med2 = Med_choice2.text

S_Med2 = CDb1(seuil_med2)

seuil_med3 = Med_choice3.text

S_Med3 = CDb1(seuil_med3)

seuil_med4 = Med_choice4.text

S_Med4 = CDb1(seuil_med4)

seuil_med5 = Med_choice5.text

S_Med5 = CDb1(seuil_med5)

seuil_med6 = Med_choice6.text

S_Med6 = CDb1(seuil_med6)

seuil_stdev = Stdev_choice.text

S_Stdev = CDb1(seuil_stdev)

'Attribution des peuplements

'Jeune forêt

if Hmedian <= S_Med1 then


```

irecordset.item(i).data("PEUPLEMENT")=0 'trouées
elseif Hmedian > S_Med1 and Hmedian <= S_Med2 then
irecordset.item(i).data("PEUPLEMENT")=2 'Recrûs
elseif Hmedian > S_Med2 and Hmedian <= S_Med3 then
irecordset.item(i).data("PEUPLEMENT")=3 'Fourrés
elseif Hmedian > S_Med3 and Hmedian <= S_Med4 then
irecordset.item(i).data("PEUPLEMENT")=4 'Perchis
'Futaies (nouvelle condition (Stdev) pour la discrimination des peuplements étagés)
elseif Hmedian > S_Med4 and Hmedian <= S_Med5 and Hstdev <= S_Stdev then
irecordset.item(i).data("PEUPLEMENT")=5 'Jeune futaie
elseif Hmedian > S_Med4 and Hmedian <= S_Med5 and Hstdev > S_Stdev then
irecordset.item(i).data("PEUPLEMENT")=8 'Peuplement étagé
elseif Hmedian > S_Med5 and Hmedian <= S_Med6 and Hstdev <= S_Stdev then
irecordset.item(i).data("PEUPLEMENT")=6 'Futaie moyenne
elseif Hmedian > S_Med5 and Hmedian <= S_Med6 and Hstdev > S_Stdev then
irecordset.item(i).data("PEUPLEMENT")=8 'Peuplement étagé
elseif Hmedian > S_Med6 and Hstdev <= S_Stdev then
irecordset.item(i).data("PEUPLEMENT")=7 'Vieille futaie
elseif Hmedian > S_Med6 and Hstdev > S_Stdev then
irecordset.item(i).data("PEUPLEMENT")=8 'Peuplement étagé
end if
Next

```

//DEUXIEME APPROCHE

//Requête: 2

```

For i = 0 to nombre_de_polygones -1
SELECT *
FROM [Requête_1]
WHERE [Requête_1].[Col_Row]="&i&"

rang = round(percentile_xx*((nombre_de_pb+1)/100)
Lngrang = CLng(rang)
set sortedHrecordset = Hrecordset.sort("H")
Qxxvalue = sortedHrecordset.Item(Lngrang).Data("H")

If Hrecordset.count > 1 Then
Hstdev = Hrecordset.StandardDeviation("H") 'calcul de l'écart-type de la distribution des PB
End If

seuil_stdev = Stdev_choice.text 'définition du seuil pour la discrimination des peuplements étagés
S_Stdev = CDBl(seuil_stdev)

'Attribution des peuplements
'Jeune forêt
if Qxxvalue <= 2 then
irecordset.item(i).data("PEUPLEMENT")=0 'prés - trouées
elseif Qxxvalue > 2 and Qxxvalue <= 4 then
irecordset.item(i).data("PEUPLEMENT")=2 'recrus
elseif Qxxvalue > 4 and Qxxvalue <= 14 then
irecordset.item(i).data("PEUPLEMENT")=3 'fourrés
elseif Qxxvalue > 14 and Qxxvalue <= 18 then
irecordset.item(i).data("PEUPLEMENT")=4 'perchis
'Futaies (nouvelle condition (Stdev) pour la discrimination des peuplements étagés)
elseif Qxxvalue > 18 and Qxxvalue <= 20 and Hstdev <= S_Stdev then
irecordset.item(i).data("PEUPLEMENT")=5 'jeunes futaies
elseif Qxxvalue > 18 and Qxxvalue <= 20 and Hstdev > S_Stdev then
irecordset.item(i).data("PEUPLEMENT")=8 'peuplement étagé
elseif Qxxvalue > 20 and Qxxvalue <= 24 and Hstdev <= S_Stdev then
irecordset.item(i).data("PEUPLEMENT")=6 'futaies moyennes
elseif Qxxvalue > 20 and Qxxvalue <= 24 and Hstdev > S_Stdev then
irecordset.item(i).data("PEUPLEMENT")=8 'peuplement étagé

```

Annexes

```
elseif Qxxvalue>24 and Qxxvalue<=40 and Hstdev<=S_Stdev then  
  irecordset.item(i).data("PEUPLEMENT")=7 ' vieilles futaies  
elseif Qxxvalue>24 and Qxxvalue<=40 and Hstdev>S_Stdev then  
  irecordset.item(i).data("PEUPLEMENT")=8 'peuplement étagé  
end if
```

Next

Résultats

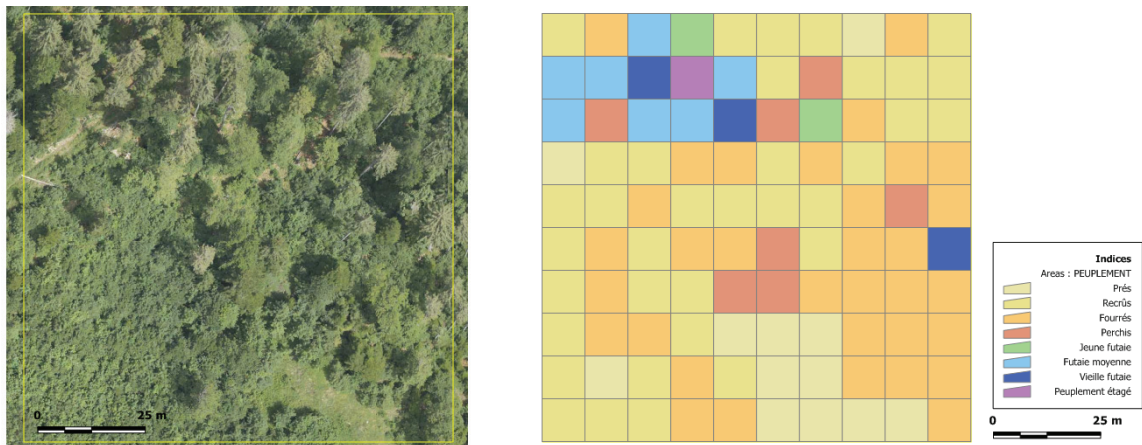


Figure D.19. Cartographie des types de peuplements: approche 1 (médiane et écart-type des hauteurs de points bruts; seuil de l'écart-type =12m).

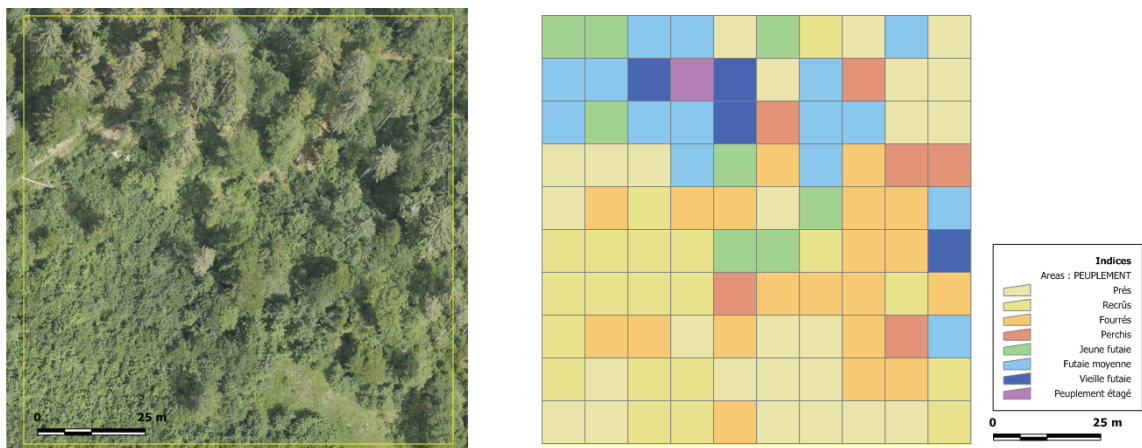


Figure D.20. Cartographie des types de peuplements: approche 2 (percentile 70 des hauteurs de points bruts; seuil de l'écart-type des hauteurs de points bruts =12m).

Remarques

Les deux approches sont similaires. L'unique différence porte sur la manière de faire varier les paramètres. Dans la première approche, on se base sur une variable statistique fixe (la médiane) avec la possibilité de faire varier les seuils qui marquent la discrimination entre les différents types de peuplement. Dans la seconde approche, les seuils sont fixes et on fait varier la variable statistique (choix du percentile). Dans les deux approches, l'identification des peuplements étagés porte sur l'analyse de l'écart-type de la distribution verticale des points bruts.

La détermination des types de peuplement sert avant tout à réaliser une classification sur la base d'une délimitation de peuplement existante. Néanmoins, l'utilisation d'une grille régulière est un complément intéressant pour valider objectivement les résultats. Ajoutons qu'une analyse avec différentes résolutions de grilles régulières apporte une information riche pour l'ajustement des meilleures paramètres.

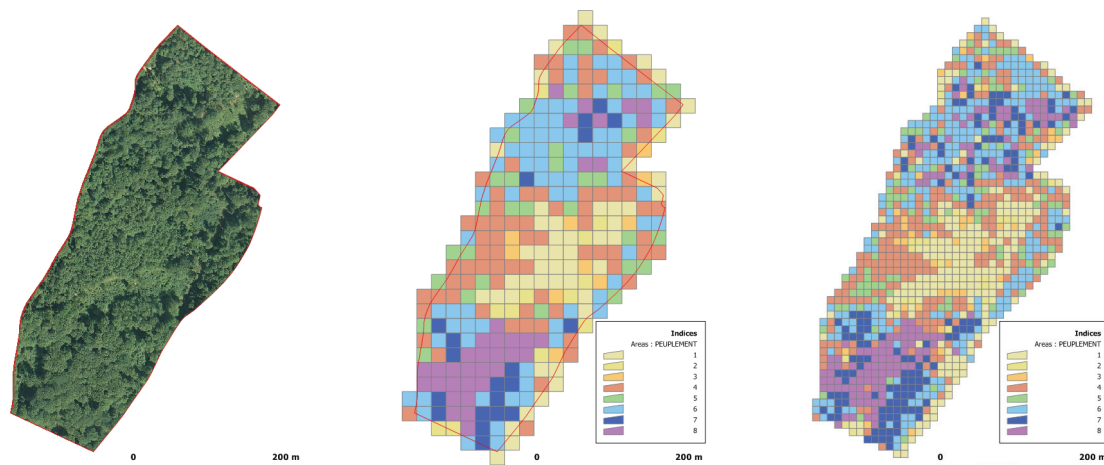


Figure D.21. Comparaison de la cartographie des types de peuplements avec des grilles régulières de résolution différentes (division 45 - Charcotet): à gauche l'orthophoto; au centre une grille régulière de 20 [m] de côté; à droite une grille régulière de 10 [m] de côté.

Potentiel d'évolution

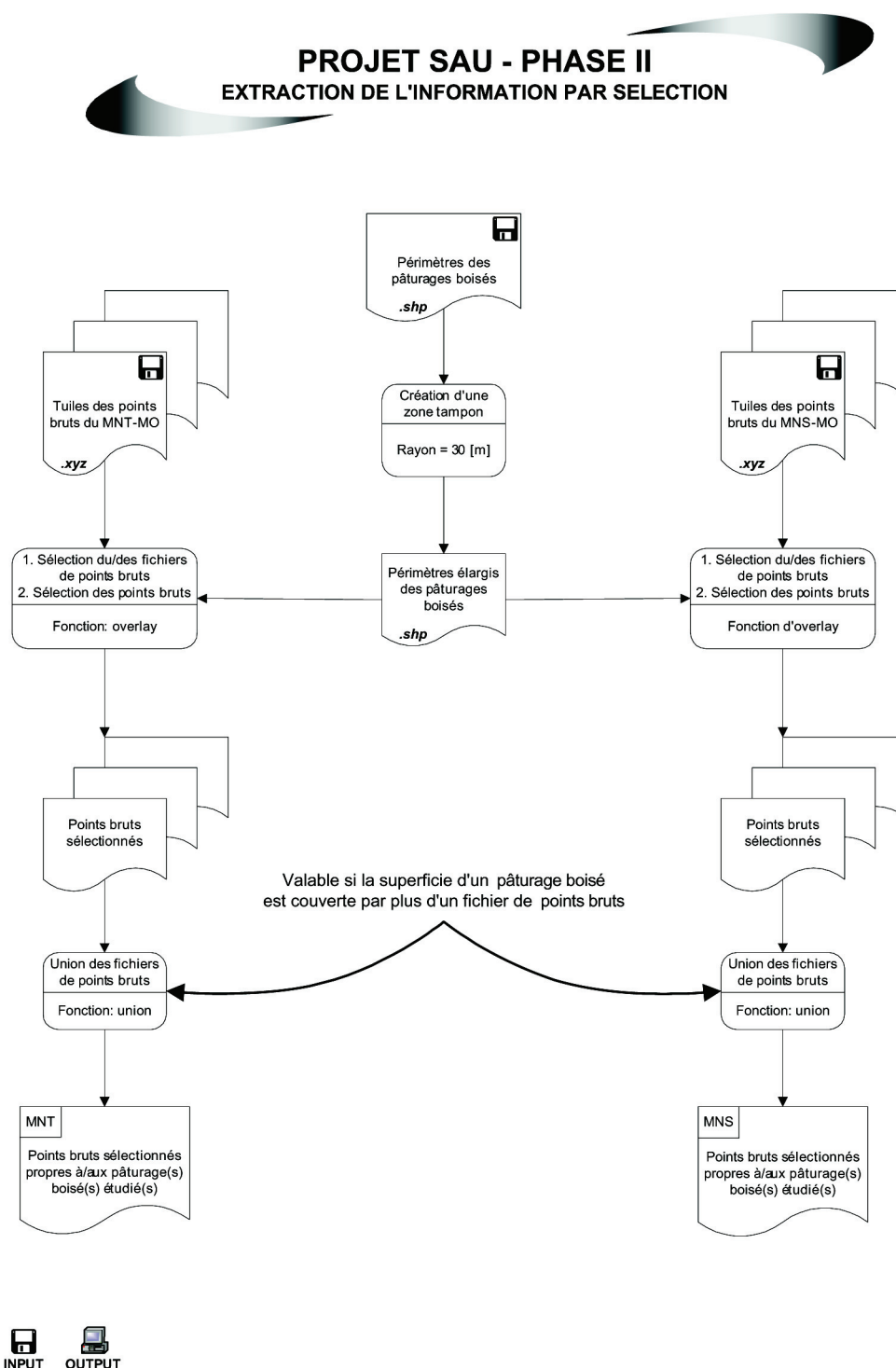
La première limitation concerne la rapidité des traitements. Une première amélioration d'ordre générale serait d'optimiser les performances de traitement en redéveloppant les algorithmes dans un langage de programmation plus puissant (C ou .NET). La création de dll serait un premier pas vers une application multi-plate-forme.

Afin de pouvoir comparer de manière optimale les différents indicateurs produits, la fonction d'export des cartes mérite d'être améliorée en ajoutant de manière automatique au nom de l'image créée les paramètres définis pour le calcul (comme par exemple les valeurs de seuils utilisés pour une cartographie des types de peuplement) ou en créant un fichier XML dédié.

Annexe D. Schémas méthodologiques détaillés pour le calcul du taux de boisement

Les quatre diagrammes suivants synthétisent les étapes clés implémentées pour le calcul du taux de boisement en pâturages boisés sur la base des modèles altimétriques LiDAR:

Diagramme 1: extraction de l'information par sélection



Annexes

Diagramme 2: interpolation des grilles

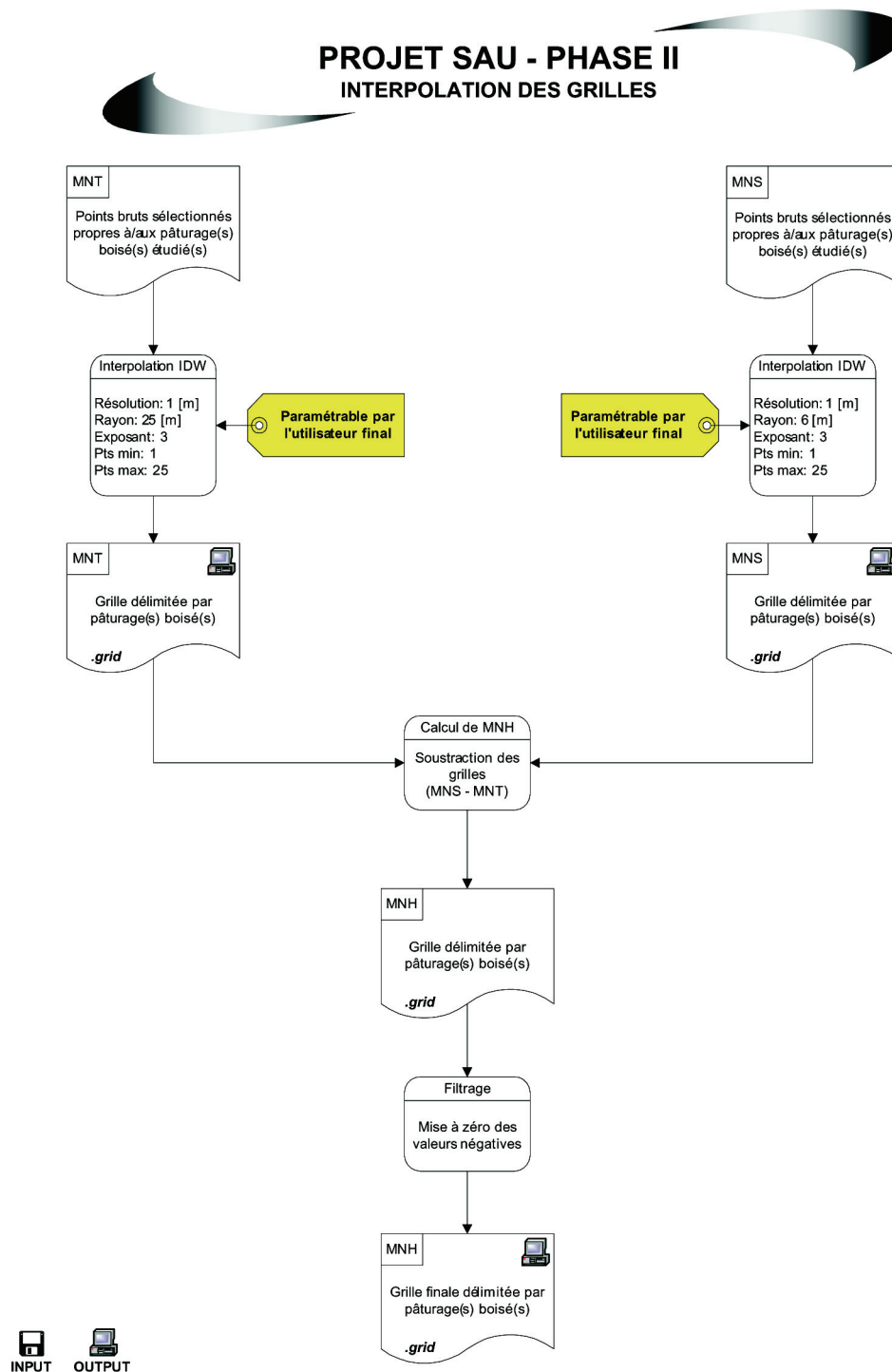


Diagramme 3: détermination du boisé

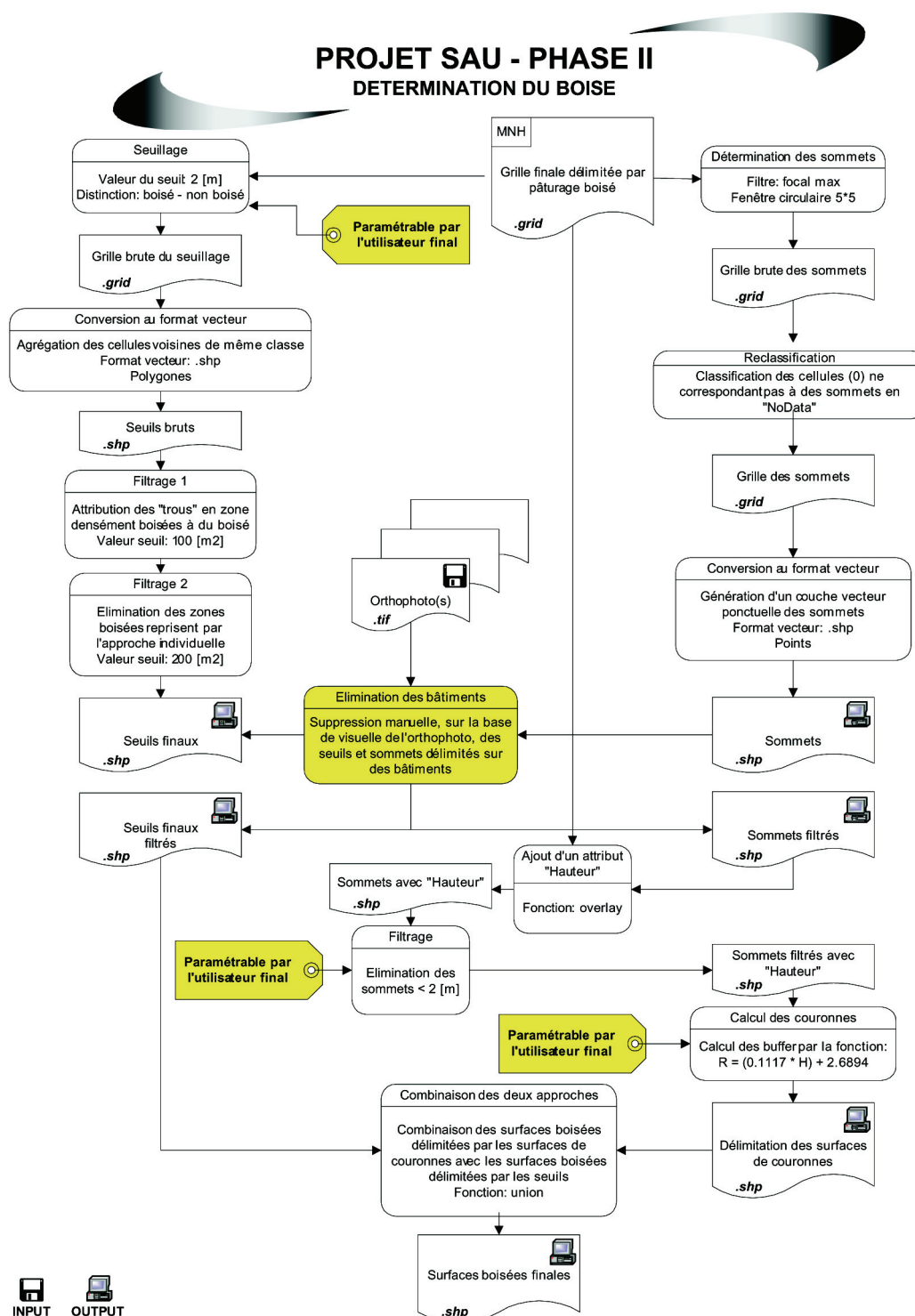
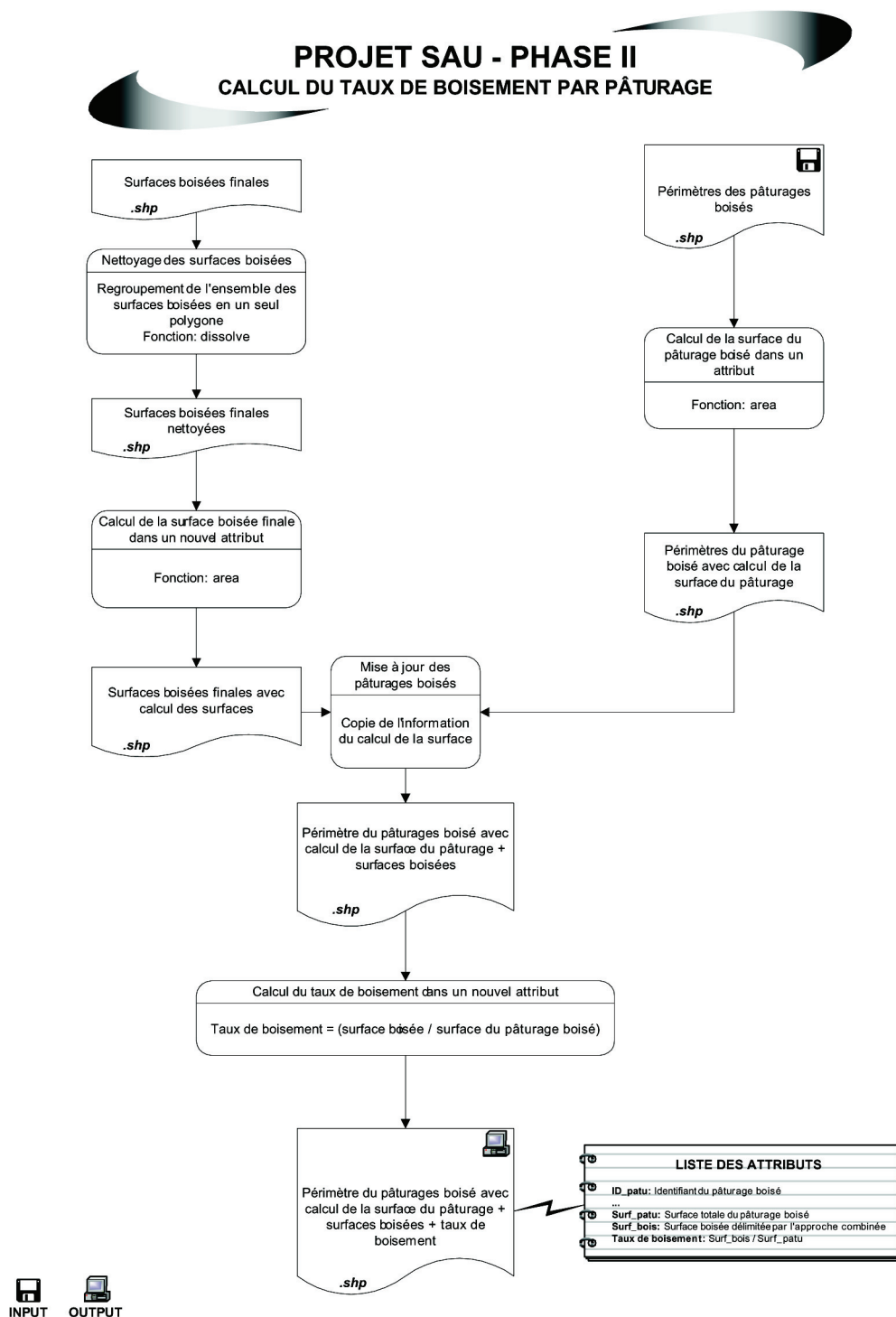


Diagramme 4: calcul du taux de boisement par pâturage boisé



Gilles GACHET

Ingénieur en Géomatique

Les Pommiers A
CH-1195 Bursinel
+41 78 742 04 59
gilles.gachet@epfl.ch
www.gilles-gachet.ch

Né le 29.09.1973
Suisse
Marié, 2 filles

Profil de Compétence

Conception et développement de système d'information.
Gestion et diffusion des géodonnées.
Spécialiste en analyse d'image et traitement des modèles altimétriques LiDAR.

Formation

2008 à ce jour	Chef de projet , Etat de Vaud, Office de l'information sur le territoire, Lausanne
2005 - 2008	Thèse de doctorat à l'EPFL , Lausanne. Titre : Analyse et exploitation des données de lidar aéroportés pour la caractérisation des milieux boisés de la suisse
2001	Diplôme postgrade en Ingénierie et Systèmes de Management de l'Environnement Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). ❖ <i>Réalisation d'un système d'information permettant de faciliter la gestion des réserves naturelles ProNatura du canton de Genève.</i>
1998	Diplôme de biologie , Université de Genève, section des Sciences. ❖ <i>Etude et mise au point de deux méthodes de prises de vues aériennes pour la cartographie de la végétation.</i> ❖ <i>Formation complémentaire en photogrammétrie et photo-interprétation (EPFL).</i>
1996	Licence de biologie , Université de Genève, section des Sciences.
1992	Maturité Fédérale type C (Sciences) avec mention, Collège Claparède, Genève.

Expérience Professionnelle

2001 - 2007	Assistant au laboratoire de SIG de l'EPFL , Lausanne. ❖ Fonctions : enseignement, travaux de recherche. ❖ Mise en place de SIG (projets & mandats externes). ❖ Technologie et applications des nouveaux modèles numériques d'altitude laser. ❖ Création d'un cours sur les modèles numériques laser et leurs applications dérivées.
1999 - 2001	Assistant de biogéographie , Université de Genève, Section des Sciences. Département de botanique et biologie végétale. <i>Méthodes et techniques pour l'étude de la végétation locale.</i>
1999 - 2000	Employé de commerce à mi-temps , Manpower SA, Genève.
1999	Employé auxiliaire , Swissport Genève SA, Genève.
1998 - 1999	Répétiteur privé , Association des Répétiteurs AJETA, Genève.
1996 - 1998	Moniteur , Université de Genève, Section des Sciences. ❖ Branches enseignées : <i>biologie marine (stages en Normandie), botanique systématique, morphologie, biologie fondamentale.</i>

Informatique

Microsoft Office	Word , Excel , PowerPoint, Access, Visio.
SIG et DAO	ArcGIS 9.1, Manifold 7.x, MapInfo 8.7 & Vertical Mapper, ArcView 3.X, GeoConcept 4.2, Saga, LandSerf, Microstation 8, TerraSolid (TerraScan, TerraModeler).
Image	Professionnal 5, Idrisi 32, ERDAS Imagine 9.1, Adobe Première, Photoshop.
Programmation	VB.NET, VB Script.
Statistique	R.
Internet	Dreamweaver, HTML, expérience dans la gestion de sites web.

Langues

Français	Langue maternelle.
Anglais	Courant.
Allemand	Connaissances scolaires.

Loisirs

Aviation	Licence de pilote privé sur monomoteur avec extension pour le vol acrobatique. ❖ <i>Activité de pilote responsable pour des vols photo.</i>
Sport	Cyclisme sur route, baseball, ski, natation, tennis.
Musique	Un penchant pour la pop-rock anglaise et la musique irlandaise.

Références

Sur demande